

627.9
3-4/2

Изданіе Института Инженеро́въ Пу́тей Сѣобщенія Императора Александра I.

КУРСЪ ВНУТРЕННИХЪ ВОДЯНЫХЪ СѢОБЩЕНІЙ

О. Г. Зброжека,

ИНЖЕНЕРА ПУТЕЙ СѢОБЩЕНІЯ,

Преподавателя и Члена Сѣѣта Института Инженеро́въ Пу́тей Сѣобщенія
Императора Александра I.

2053
Инженеро́въ Пу́тей Сѣобщенія
Императора Александра I.

Выпускъ I-й

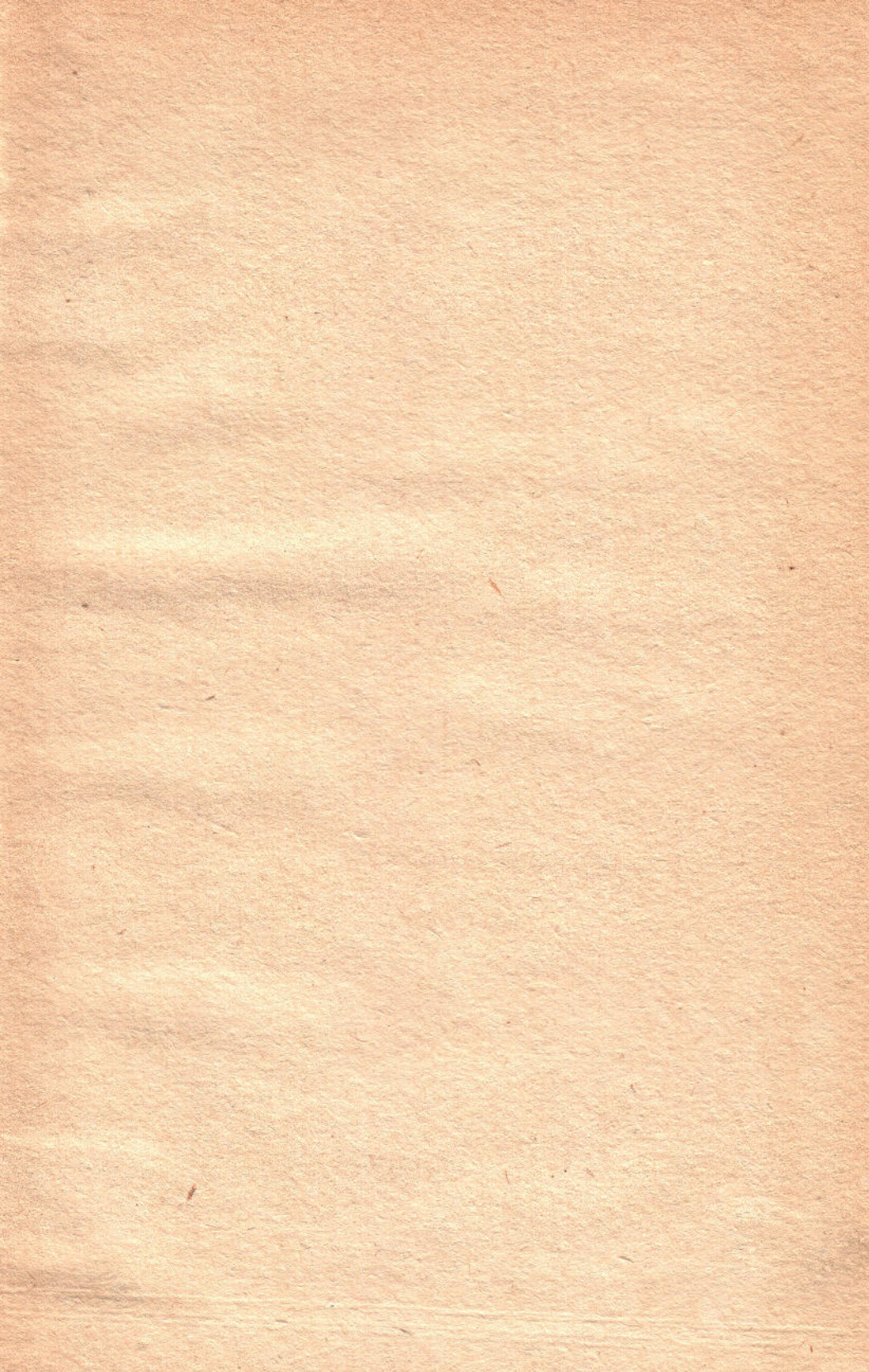
съ 15 таблицами чертежей,

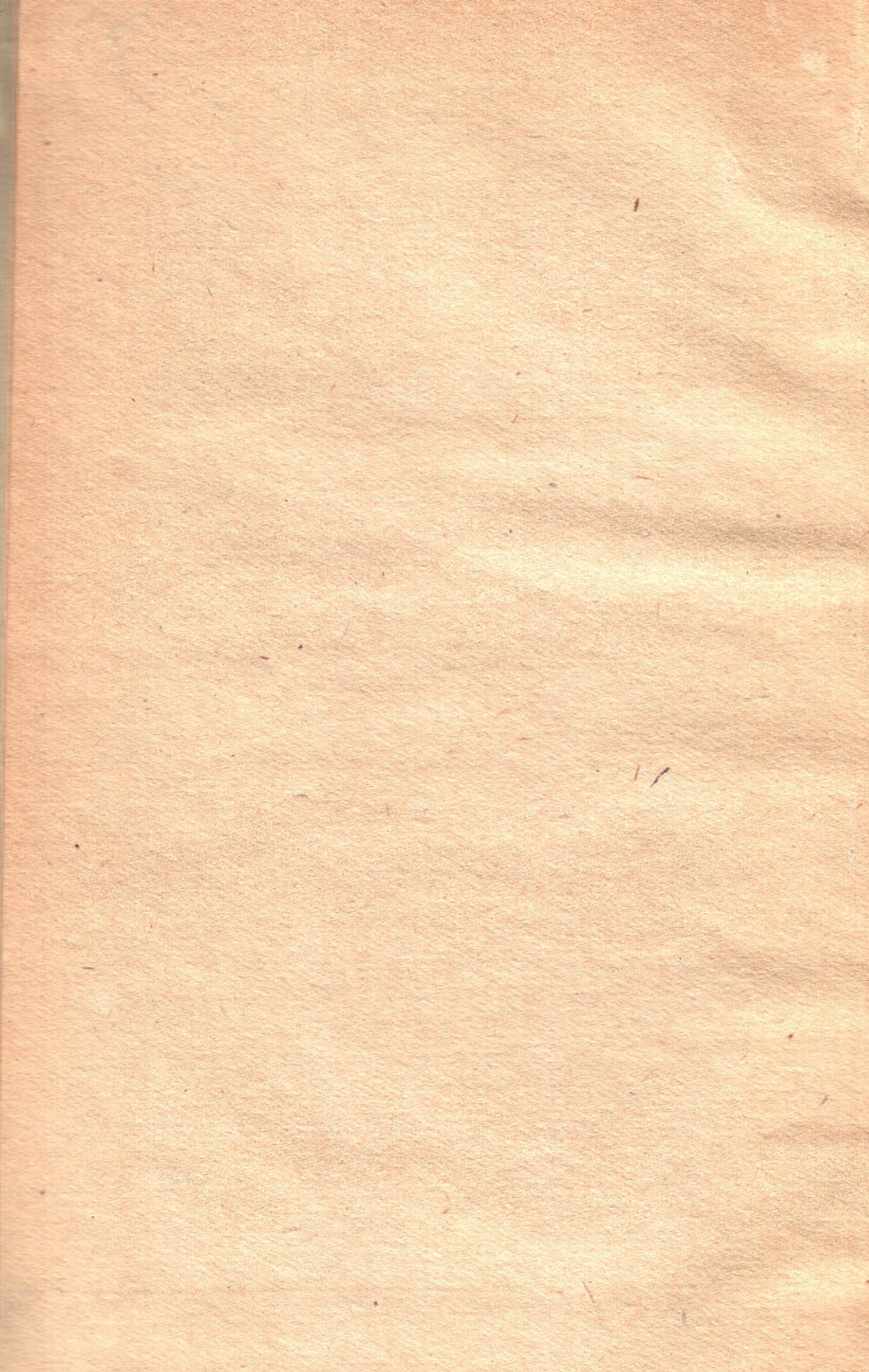
ИЗДАНІЕ ВТОРОЕ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Типографія Ю. Н. Эрлихъ, Садовая, № 9.
1897.

2053





Изданіе Института Инженеровъ Путей Сообщенія Императора Александра I.

627.9
3-41
5-12

КУРСЪ ВНУТРЕННИХЪ ВОДЯНЫХЪ СООБЩЕНІЙ

Ө. Г. Зброжека,

ИНЖЕНЕРА ПУТЕЙ СООБЩЕНІЯ,

Преподавателя и Члена Совета Института Инженеровъ Путей Сообщенія
Императора Александра I.

проверено
1966 г.

Выпускъ I-й

съ 15 таблицами чертежей.

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія Ю. И. Эрлихъ, Садовая, № 9.
1897.


~~~~~  
Печатано по распоряженію Института инженеровъ путей сообщенія  
ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I.  
~~~~~


ОГЛАВЛЕНІЕ.

ВВЕДЕНІЕ.

Стр.

§ 1. Значеніе внутреннихъ водяныхъ сообщеній.	1
§ 2. Предметъ курса.	3

ОТДѢЛЪ I.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЯ СВѢДѢНІЯ.

ГЛАВА I.

Рѣки въ естественномъ состояніи.

§ 1. Происхожденіе и питаніе рѣкъ водою.	5
§ 2. Гидродинамическіе элементы рѣчнаго потока.	10
§ 3. Общія свойства движенія рѣчнаго потока.	26
§ 4. Движеніе насосовъ	27
§ 5. Образованіе русла рѣчныхъ потоковъ	35
§ 6. Ледъ и его движенія.	41

ГЛАВА II.

Способы передвиженія грузовъ по внутреннимъ водянымъ путямъ и условія путей, имъ соответствующія.

§ 1. О способахъ передвиженія грузовъ водою вообще.	44
§ 2. Сплавъ	46
§ 3. Суда и условія ихъ движенія.	50
§ 4. Тяга судовъ.	103



OLIVIA

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

THE

Замѣченныя опечатки.

<i>Стр.:</i>	<i>Строка:</i>	<i>Напечатано:</i>	<i>Слѣдуетъ:</i>
12	2 и 6 сверху	984,27	98,427
19	13 "	для измѣ-	для измѣре-
23	8 "	соотвѣтствующей	соотвѣтствующій
23	30 "	горизонтальнымъ	горизонтальномъ
25	15 "	$k = 14$	$k_1 = 14$
27	13 снизу	естественнаго	естественнаго
42	16 "	ее	ея
48	8 "	имѣющаго	имѣющагося
49	15 "	рысковомъ	рыковымъ
51	15 сверху	дѣлить	дѣлить.
53	3 снизу	ω_{n-2}	ω_{n-2}
54	1, 10, 19 снизу	параллелоипеда	параллелепипеда
56	10 "	яъ	въ
58	16 "	B''	b''
64	17 сверху	гаворять	говорять
65	3 снизу	параллелоипеда	параллелепипеда
69	17 сверху	опытмъ	опытамъ
80	4 снизу	$\frac{Wv^2}{\rho}$	$\frac{\mathfrak{W}v^2}{\rho}$
90	3 сверху	поворотахъ	поворотахъ

ВВЕДЕНІЕ.

§ 1. Значеніе внутреннихъ водяныхъ сообщеній.

Водяными путями сообщеній вообще называются такіе водные потоки и скопленія, по коимъ возможно перемѣщеніе грузовъ.

Изъ нихъ моря и океаны, омывающіе *извѣстныя* границы странъ и континентовъ, отличаются какъ пути столь существенными особенностями отъ озеръ, рѣкъ и каналовъ, расположенныхъ внутри странъ, что, соотвѣтственно сему различію, изученіе благоустройства водяныхъ путей распадается на 2 курса: *путей вѣнскихъ* и *путей внутреннихъ*.

Изъ числа внутреннихъ водяныхъ путей, составляющихъ предметъ нашихъ занятій, рѣки почти всюду имѣютъ наибольшее распространеніе и въ развитіи промышленности и цивилизаціи народовъ получили историческое значеніе ранѣе всякаго рода другихъ путей сообщенія. По теченію ихъ возникали поселенія, нарождались и развивались центры промышленности и торговли, совершались великія переселенія народовъ и, можно сказать, успѣхи промышленности и цивилизаціи странъ находились въ прямой зависимости отъ тѣхъ удобствъ, которыя представляли прорѣзывающія ихъ рѣки, какъ для сообщеній *внутреннихъ*, такъ и для выхода въ моря, т. е. для сообщеній *вѣнскихъ*.

Съ развитіемъ улучшенныхъ сухопутныхъ сообщеній, значеніе рѣкъ, какъ путей, видоизмѣнилось, но сохранило значительную силу. Онѣ и въ настоящее время представляютъ собою жизненные артеріи странъ, въ удобномъ состояніи—дающія населенію массу даровыхъ благъ, а въ неудобномъ и заброшенномъ—приносящія ему вредъ наводненіями, затопленіями и размывами земель. Кромѣ сего, удобные водяные пути вообще и въ томъ числѣ рѣки въ особенности:

во 1) даютъ средства дешевыхъ мѣстныхъ сообщений и тѣмъ способствуютъ развитію промышленныхъ силъ страны, поднимаютъ ея благосостояніе и порождаютъ, такъ сказать, грузы для всякаго рода путей,

во 2) служатъ подвозными путями къ желѣзнымъ дорогамъ,

въ 3) давая наиболѣе дешевые способы для перемѣщенія на большія разстоянія грузовъ малоцѣнныхъ и громоздкихъ, снимаютъ невыгодное бремя перемѣщенія сихъ грузовъ съ желѣзныхъ дорогъ, всегда имѣющихъ ограниченную провозо-способность,

и въ 4) будучи путями общаго свободнаго пользованія и обладая часто неограниченною провозо-способностью, служатъ, такъ сказать, оплотомъ въ борьбѣ противъ вредныхъ сторонъ монополіи желѣзныхъ дорогъ по передвиженію грузовъ, если дороги эти находятся въ рукахъ частныхъ предпринимателей.

Изъ этого слѣдуетъ, что только при извѣстномъ *соответствіи* въ благоустройствѣ внутреннихъ водяныхъ путей, желѣзныхъ дорогъ и другихъ сообщений, могутъ быть достигнуты наилучшіе результаты въ содѣйствіи промышленности, торговлѣ и общему экономическому преуспѣянію страны и что развитіе сѣти желѣзныхъ дорогъ въ какой бы то ни было странѣ не только не избавляетъ ее отъ заботъ улучшенія внутреннихъ водяныхъ путей, но должно порождать новыя заботы въ этомъ направленіи.

Мысль эту удачно выразилъ представитель Франціи на бывшемъ въ 1888 году во Франкфуртѣ на Майнѣ Международномъ Конгрессѣ по внутреннему судоходству, инженеръ Буле, слѣдующимъ образомъ:

«Изъ желѣзныхъ дорогъ наиболѣе преуспѣваютъ тѣ, которыя идутъ *вдоль* наиболѣе дѣятельныхъ водяныхъ путей. Всюду, гдѣ эти послѣдніе пути были улучшены, по нимъ увеличилось судоходство, нисколько не нанося ущерба развитію дѣятельности желѣзныхъ дорогъ. Для подтвержденія сего достаточно указать на желѣзныя дороги, параллельныя Рейну, Эльбѣ и Сенѣ и сѣти каналовъ Сѣверной Франціи, сѣти продолжающейся отъ Бельгіи до Парижа. Каналы эти, наиболѣе работающіе во всей Франціи, въ 1886 году перевезли 35% (440 милліоновъ пуд.) общей массы грузовъ всѣхъ французскихъ водныхъ путей; а между тѣмъ Сѣверное Общество желѣзныхъ дорогъ (Chemin de fer du Nord), сѣтъ котораго находится въ непосредственной конкуренціи съ каналами, въ настоящее время есть

единственное общество во Франціи, не прибѣгшее къ правительственной поддержкѣ для гарантіи дохода своимъ акціонерамъ. Наоборотъ, судоходство не было въ состояніи выдержать конкуренціи съ желѣзными дорогами въ тѣхъ мѣстностяхъ, гдѣ рѣки не были достаточно улучшены или же оставались въ первобытномъ состояніи; но такая мѣстная утрата для судоходства не увеличила процвѣтанія конкурирующихъ желѣзныхъ дорогъ».

Въ Россіи, при ея громадномъ пространствѣ и слабой промышленной производительности, при преобладающемъ производствѣ грузовъ малоцѣнныхъ и громоздкихъ, при необходимости перемѣщенія ихъ на очень большія разстоянія для сбыта на европейскіе рынки и при томъ неблагоприятномъ условіи, что внутренніе водяные пути ея, вслѣдствіе замерзанія, почти на $\frac{1}{2}$ года дѣлаются недоступными для пользованія, вопросъ о благоустройствѣ внутреннихъ водяныхъ путей имѣетъ гораздо большее значеніе, чѣмъ въ какомъ-либо другомъ европейскомъ государствѣ.

Въ западныхъ государствахъ Европы сѣть внутреннихъ водяныхъ путей уже доведена до извѣстной степени совершенства и соотвѣстствія съ сѣтью желѣзныхъ дорогъ; въ ней насчитывается около 17000 верстъ искусственныхъ водяныхъ путей и около 24000 верстъ естественно-судоходныхъ рѣкъ, и всетаки дальнѣйшее улучшеніе и развитіе этой сѣти составляетъ предметъ постоянныхъ заботъ. Между тѣмъ, въ Европейской Россіи, своею площадью превосходящей во много разъ площадь всѣхъ западно-европейскихъ государствъ, взятыхъ вмѣстѣ, имѣется лишь 2025 верстъ искусственныхъ водяныхъ путей, въ томъ числѣ 754 версты каналовъ, и 67771 верста естественныхъ водяныхъ путей (въ томъ числѣ озеръ по ходовымъ линіямъ 738 верстъ, сплавныхъ рѣкъ 32414 верстъ и судоходныхъ 34619 верстъ), благоустройство коихъ находится лишь въ зачаткѣ. Поэтому предстоящія заботы государства по благоустройству внутреннихъ водяныхъ путей Россіи должны быть еще очень велики, и изученіе этого дѣла должно составлять одну изъ важнѣйшихъ задачъ русскихъ инженеровъ Путей Сообщенія.

§ 2. Предметъ курса.

Изъ числа внутреннихъ водяныхъ путей озера, въ зависимости отъ ихъ величины, по свойствамъ своимъ, какъ пути сообщенія,

приближаются или къ морямъ и требуютъ сооруженій, аналогичныхъ съ приморскими сооруженіями, составляющими предметъ особаго курса, или къ рѣкамъ и каналамъ и требуютъ нѣкоторыхъ такихъ же работъ, какъ рѣки и каналы; поэтому предметомъ настоящаго курса будутъ собственно рѣки и каналы; объ озерахъ же мы будемъ говорить лишь въ подходящихъ случаяхъ. Рѣки, хотя и представляютъ собою вообще *естественные*, т. е. данные природою, водяные пути, тѣмъ не менѣе въ природѣ нѣтъ такихъ рѣкъ, которыя бы на всемъ протяженіи удовлетворяли всѣмъ требованіямъ удобнаго передвиженія по нимъ грузовъ. Вообще на всѣхъ рѣкахъ требуются особыя приспособленія для отпуски и приѣма грузовъ, для ихъ стоянокъ, для безопаснаго направленія въ пути и наконецъ для самого ихъ передвиженія. Кромѣ того, для удовлетворенія данныхъ потребностей передвиженія грузовъ въ рѣкѣ могутъ быть необходимы или такого рода работы по расчисткѣ и улучшенію русла ея, которыя не измѣняютъ существа ея, какъ свободнаго потока, т. е. не нарушаютъ, такъ сказать, ея естественнаго быта; или такія сооруженія, съ помощью коихъ рѣка обращается въ рядъ искусственныхъ озеръ, сообщающихся между собою (для пропуска воды и грузовъ) особыми приспособленіями, т. е. теряетъ свойства естественнаго потока.

За симъ, такъ какъ для уясненія техническихъ мѣръ благоустройства и улучшенія рѣкъ въ судоходномъ отношеніи вообще необходимо знать общія свойства рѣкъ и тѣ требованія, удовлетвореніе коимъ необходимо для дешеваго, удобнаго и безопаснаго передвиженія по нимъ грузовъ, то изложеніе по предмету нашего курса распадается на слѣдующіе отдѣлы:

1) Предварительныя общія свѣдѣнія: а) о происхожденіи, питаніи водою и свойствахъ рѣчныхъ потоковъ и б) о способахъ передвиженія грузовъ и соотвѣтствующихъ имъ условіяхъ водяныхъ путей.

2) Технические мѣры благоустройства и улучшенія естественнаго судоходнаго состоянія рѣкъ.

3) Приведеніе рѣкъ въ искусственно-судоходное состояніе.

и 4) Устройство искусственныхъ водяныхъ путей, т. е. каналовъ.

ОТДѢЛЪ I.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЯ СВѢДѢНІЯ.

ГЛАВА I.

Рѣки въ естественномъ состояніи.

§ 1. Происхожденіе и питаніе рѣкъ водою.

Поверхность земной суши, какъ извѣстно, понижается террасами или постепенными скатами къ океанамъ, морямъ и большимъ озерамъ, образуя иногда системы долинъ (талвеговъ), послѣдовательно сливающихся въ одну долину (главный талвегъ), впадающую въ океанъ, море или озеро. Каждая система такихъ долинъ отдѣляется отъ сосѣднихъ съ нею системъ линіями возвышеній (водораздѣлами) и называется бассейномъ; причемъ каждый такой главный бассейнъ заключаетъ въ себѣ систему малыхъ водораздѣловъ, дѣлящихъ его по порядку входящихъ въ систему долинъ на бассейны 2-го, 3-го и т. д. порядковъ.

Вода атмосферныхъ осадковъ, выпадающихъ на площадь какого-либо бассейна, какъ извѣстно, частью испаряется, частью просачивается въ землю и частью стекаетъ по скатамъ въ долины, къ талвегамъ. Просачивающаяся въ землю вода заполняетъ постепенно промежутки между частицами рыхлыхъ напластованій, а также трещины и разсѣлины горныхъ породъ и подъ вліяніемъ силы тяжести выбивается внаружу въ пониженныхъ точкахъ земной поверхности въ видѣ источниковъ, называемыхъ *ключами*.

Ключи бываютъ тѣмъ обильнѣе водою, т. е. тѣмъ большее количество ея даютъ въ единицу времени, чѣмъ *водопроницаемость* на-

пластованій, дающихъ имъ воду, больше, и чѣмъ больше тотъ напоръ, подѣ которымъ происходитъ истеченіе воды. Они бываютъ *постоянными* (неизсякающими) въ томъ случаѣ, если питающій ихъ запасъ воды въ нѣдрахъ земли настолько великъ, что не можетъ израсходоваться во время самыхъ большихъ промежутковъ между пополненіями его изъ атмосферныхъ осадковъ, и *временными* или *перемежающимися* въ томъ случаѣ, если питающій ихъ запасъ воды расходуется весь въ промежутки между послѣдовательными пополненіями его изъ атмосферныхъ осадковъ.

Воды *постоянныхъ* и *перемежающихся* ключей, направляясь къ ближайшимъ тальвегамъ, образуютъ въ нихъ ручьи; отъ сліянія ручьевъ образуются второстепенныя рѣки, впадающія въ главный тальвегъ, и въ немъ образуется главная рѣка.

Кромѣ сего, верховья рѣкъ и ручьевъ иногда получаютъ питаніе отъ таянія горныхъ ледниковъ и снѣговъ.

Если рельефъ земной поверхности не даетъ естественныхъ долинъ, въ направленіи коихъ свободно могутъ образоваться постоянные ручьи и рѣки, то скопившіяся воды ключей и горныхъ источниковъ вымываютъ себѣ въ направленіи уклоновъ мѣстности пути, называемые *вымывными долинами*. Въ верховьяхъ такихъ вымывныхъ долинъ скопленія воды нерѣдко представляютъ собою болота и озера болѣе или менѣе значительныхъ размѣровъ.

Постоянные потоки ручьевъ и рѣкъ получаютъ еще дополнительное питаніе отъ встрѣчающихся по пути ихъ ключей и по временамъ отъ непосредственнаго притока наземныхъ атмосферныхъ водъ, т. е. отъ той части водъ атмосферныхъ осадковъ, которая стекаетъ непосредственно со скатовъ бассейна въ тальвеги. Количество наземныхъ водъ можетъ быть весьма разнообразно и очень велико; оно зависитъ отъ интенсивности выпаденія или вообще прибыли атмосферной воды, отъ площади бассейна, отъ крутизны его скатовъ, отъ большей или меньшей водопроницаемости ихъ напластованій, отъ состоянія поверхности скатовъ, т. е. будетъ ли она ровная или нѣтъ, покрытая или непокрытая растительностью и т. п., и наконецъ отъ разныхъ случайныхъ сочетаній. Такъ напр. прибыль наземныхъ водъ въ рѣкахъ можетъ значительно увеличиться въ томъ случаѣ, если сильный дождь выпадетъ на поверхность скатовъ, замерзшую или насыщенную отъ прежде бывшихъ дождей, или же если во время весенняго таянія снѣговъ выпадетъ теплый дождь.

Между количествомъ воды, протекающимъ черезъ опредѣленное сѣченіе рѣки и поступающимъ въ рѣку изъ разныхъ источниковъ выше этого сѣченія, всегда существуетъ нѣкоторая опредѣленная зависимость; тѣмъ не менѣе количества эти никогда не бываютъ равны, ибо часть воды, поступающей въ рѣку, теряется испареніемъ и фильтраціей въ русло рѣки. Потеря воды изъ рѣки испареніемъ пропорціональна площади водной поверхности рѣки и высотѣ испаряющагося слоя, которая въ свою очередь зависитъ отъ условій климатическихъ и метеорологическихъ. Потеря эта невелика и достигаетъ чувствительныхъ размѣровъ лишь въ концѣ значительныхъ протяженій рѣки. Потеря воды изъ рѣки черезъ фильтрацію зависитъ отъ глубины рѣки, площади и *водопроницаемости* русла и въ зависимости отъ этой послѣдней можетъ достигнуть весьма значительныхъ размѣровъ на небольшомъ протяженіи.

Итакъ мы видимъ:

1) что *питаніе рѣчныхъ потоковъ водою* вообще происходитъ изъ слѣдующихъ источниковъ:

а) изъ горныхъ источниковъ (отъ таянія горныхъ ледниковъ и снѣговъ),

б) изъ ключей постоянныхъ и перемежающихся, расположенныхъ какъ въ верховьѣ, такъ и по теченію потока,

в) непосредственно изъ атмосферныхъ осадковъ, т. е. отъ той части ихъ, которая непосредственно стекаетъ со скатовъ бассейна,

и г) изъ притоковъ, т. е. впадающихъ второстепенныхъ рѣчныхъ потоковъ и ручьевъ,

и 2) что *количество воды*, протекающей въ рѣкѣ въ единицу времени, представляетъ собою величину, переменную во времени и пространствѣ, т. е. что *расходъ воды* въ рѣкѣ бываетъ различенъ въ разныхъ мѣстахъ рѣки въ одно и то же время, и въ томъ же мѣстѣ въ разное время.

Въ каждомъ данномъ сѣченіи рѣки между расходами воды и соотвѣтствующими имъ глубинами, т. е. возвышеніями горизонта воды надъ дномъ рѣки, существуетъ всегда нѣкоторая зависимость. Зависимость эту мы постараемся точнѣе выяснитъ впослѣдствіи; здѣсь же замѣтимъ, что горизонтъ воды въ рѣкѣ возвышается съ увеличеніемъ расхода воды и понижается съ уменьшеніемъ его; поэтому въ отношеніи питанія водою, въ каждой рѣкѣ различаются:

1) *Меженное состояніе*, въ коемъ рѣка получаетъ воду главнымъ образомъ *) изъ постоянныхъ источниковъ и ключей. Расходъ воды въ этомъ состояніи рѣки не сохраняетъ постоянной величины, а въ нѣкоторыхъ предѣлахъ увеличивается и уменьшается въ зависимости отъ измѣненій въ количествахъ воды, даваемыхъ источниками и ключами, и отъ случайныхъ мѣстныхъ небольшихъ прибылей атмосферной воды. Вслѣдствіе сего въ меженномъ состояніи рѣки въ свою очередь различаются слѣдующіе *горизонты воды*:

а) *Нормальный меженный горизонтъ*, т. е. горизонтъ бывающій въ меженномъ состояніи ежегодно и соотвѣтствующій среднему возвышенію воды надъ дномъ рѣки, выведенному изъ наблюдений большаго числа лѣтъ.

б) *Низкій меженный горизонтъ*, т. е. обыкновенно бывающій самый низкій горизонтъ въ межень, соотвѣтствующій среднему изъ наблюденныхъ въ теченіи многихъ лѣтъ самыхъ малыхъ возвышеній воды надъ дномъ рѣки.

и в) *Самый низкій меженный горизонтъ*, т. е. такой, ниже котораго, по наблюденіямъ многихъ лѣтъ, вода никогда не опускалась.

2) *Состояніе наводковъ*, въ которомъ рѣка, кромѣ воды постоянныхъ источниковъ и ключей, получаетъ еще болѣе или менѣе значительныя количества наземныхъ водъ изъ атмосферныхъ осадковъ. Въ этомъ состояніи имѣютъ значеніе наблюденныя за много лѣтъ наивысшіе горизонты обыкновенныхъ наводковъ въ разное время года.

и 3) *Состояніе половодья*, въ которомъ рѣка, кромѣ воды источниковъ и ключей, ее питающихъ, получаетъ наибольшее въ году количество наземныхъ атмосферныхъ водъ; въ этомъ состояніи рѣка переполняетъ свое русло, большею частью выходитъ изъ береговъ и затопляетъ долину, причемъ различаются:

а) *горизонтъ обыкновенныхъ высокихъ водъ*, или нормальный го-

*) Теоретически вѣрнымъ было бы назвать *меженнымъ* такое состояніе рѣки, при коемъ она получаетъ исключительно лишь воду постоянныхъ источниковъ и ключей, и когда въ бассейнѣ ея дожди не выпадаютъ и нѣтъ таянія снѣговъ; въ дѣйствительности такое состояніе рѣкъ болѣею частью бываетъ весьма кратковременно, а потому меженнымъ считаютъ и такое состояніе рѣкъ, при коемъ къ водѣ постоянныхъ источниковъ и ключей прибавляются *небольшія* количества атмосферныхъ водъ.

ризонть высокихъ водъ, соотвѣтствующій среднему изъ наибольшихъ возвышеній воды надъ дномъ рѣки, наблюденныхъ неоднократно въ теченіи многихъ лѣтъ,

и б) *наивысшій горизонтъ высокихъ водъ*, т. е. горизонтъ, до коего высокія воды доходили, но выше коего, по наблюденіямъ многихъ лѣтъ, не подымались.

Расходы воды въ рѣкахъ при разныхъ горизонтахъ бываютъ вообще весьма различны, но величина каждаго рѣчнаго потока характеризуется собственно полнымъ расходомъ воды въ устьѣ его при *нормальномъ* меженнемъ горизонтѣ. Рѣки, въ коихъ расходъ этотъ не превышаетъ 1 кб. саж. въ 1", можно считать малыми рѣками, рѣки съ расходомъ отъ 1 до 10 кб. саж. — средними и съ расходомъ свыше 10 кб. с. — большими рѣками.

Если путемъ послѣдовательныхъ измѣреній и вычисленій опредѣлить все то количество воды, которое протекаетъ черезъ *данное поперечное сѣченіе* рѣки въ теченіи нѣсколькихъ лѣтъ (10—15), и изъ этого количества вывести средній расходъ въ 1", то расходъ этотъ называется *модулемъ* рѣки въ данномъ ея сѣченіи. Величина *модуля* зависитъ отъ площади бассейна, питающей разными путями данное сѣченіе рѣки, отъ той доли выпадающаго средняго годоваго слоя атмосферныхъ осадковъ, которая проводится подземными и наземными путями бассейна къ рѣкѣ, и отъ водопроводныхъ способностей русла рѣки выше даннаго ея сѣченія. Если всѣ эти условія остаются неизмѣнными, то *модуль* представляетъ собою *постоянную* величину, что и имѣетъ мѣсто до извѣстной степени, въ большинствѣ случаевъ.

Расходы воды при разныхъ горизонтахъ ея въ данномъ сѣченіи рѣки могутъ быть выражены умноженіемъ модуля на нѣкоторые коэффициенты. Для нормальныхъ расходовъ меженныхъ и высокихъ водъ, коэффициенты эти, очевидно, должны были бы представлять собою нѣкоторыя постоянныя величины; но въ дѣйствительности оказывается, что они лишь временно постоянны и почти во всѣхъ рѣкахъ, съ теченіемъ времени, измѣняются такъ, что коэффициенты меженныхъ расходовъ уменьшаются, а коэффициенты расходовъ высокихъ водъ увеличиваются. Явленіе это, указывающее на то, что почти во всѣхъ рѣкахъ, со временемъ, притокъ подземныхъ водъ уменьшается, а притокъ наземныхъ атмосферныхъ водъ увеличивается,

происходить главнымъ образомъ, какъ показали изслѣдованія, отъ вырубки лѣсовъ и вообще отъ уничтоженія растительности *въ мѣстностяхъ, питающихъ ключи*, и отъ поверхностныхъ землеосушительныхъ работъ, производимыхъ съ земледѣльческими, санитарными и строительными цѣлями.

Въ зависимости отъ площадей и разныхъ условій бассейновъ, соотношенія между расходами *нормальныхъ высокихъ* и *меженныхъ* водъ въ рѣкахъ бываютъ весьма разнообразны и вообще выражаются довольно крупными цифрами; во многихъ рѣкахъ расходы высокихъ водъ превосходятъ въ 100 и болѣе разъ расходы меженныхъ водъ.

По наблюденіямъ съ 1876 по 1881 годъ годовыя амплитуды колебаній горизонтовъ воды, т. е. возвышенія среднихъ высокихъ горизонтовъ воды надъ средними низкими на нѣкоторыхъ русскихъ рѣкахъ достигали слѣдующихъ размѣровъ:

	Въ устьѣ.	На остальн. протяж.
На р. Волгѣ . . .	1,66 саж.	отъ 3,5 до 5,7 саж.
» » Окѣ . . .	— »	» 3,56 » 6,55 »
» » Днѣпрѣ . .	0,90 »	» 1,6 » 4,36 »
» » Дону . . .	1,97 »	» 3,22 » 3,29 »
» » Зап. Двинѣ .	1,26 »	» 3,39 » 3,91 »

§ 2. Гидродинамическіе элементы рѣчнаго потока.

Движеніе водяного потока вообще опредѣляется совокупнымъ соотношеніемъ нѣкоторыхъ элементовъ, которые можно назвать гидродинамическими. Такъ, мы знаемъ, что расходъ воды въ какомъ-либо поперечномъ сѣченіи русла потока зависитъ отъ двухъ элементовъ: отъ площади *живаго сѣченія*, т. е. той площади поперечнаго сѣченія русла, которая занята водою, отъ *средней* скорости струй въ этомъ сѣченіи и выражается такъ:

$$Q = \Omega \cdot v \dots \dots \dots (1)$$

гдѣ Q — расходъ,

Ω — площадь,

v — скорость.

За симъ мы знаемъ, что *средняя скорость v* въ свою очередь зависитъ:

а) Отъ величины *подводнаго радіуса* или *гидравлической глу-*

бины, т. е. отъ отношенія площади живаго сѣченія къ подводному периметру его $R = \frac{\Omega}{p}$.

б) Отъ продольнаго уклона поверхности воды и, наконецъ,

в) Отъ тѣхъ сопротивленій движенію, которыя встрѣчаетъ вода по подводному периметру русла.

Соотношеніе этихъ элементовъ выражается слѣдующимъ дифференціальнымъ уравненіемъ съ коэффициентами Дарси-Базена:

$$dy = \alpha \cdot \frac{v \cdot dv}{g} + A \cdot \frac{v^2}{R} ds \dots \dots \dots (2)$$

гдѣ v — средняя скорость,

g — ускореніе силы тяжести,

dy — паденіе поверхности воды на элементъ длины потока,

ds — элементъ длины потока,

R — подводный радіусъ,

A — коэффициентъ сопротивленія,

α — коэффициентъ поправки.

По Дарси-Базену:

Для руселъ земляныхъ:

Для исчисленій:

$$\begin{aligned} A &= 0,00028 \left(1 + \frac{1,25}{R} \right) = 0,00028 + \frac{0,00035}{R} \text{ въ метрахъ;} \\ &= 0,0000853 \left(1 + \frac{4,10}{R} \right) = 0,0000853 + \frac{0,00035}{R} \text{ въ футахъ;} \\ &= 0,0006 \left(1 + \frac{0,586}{R} \right) = 0,0006 + \frac{0,00035}{R} \text{ въ саженьяхъ.} \end{aligned}$$

Для руселъ, покрытыхъ грубо-околотымъ камнемъ:

$$\begin{aligned} A &= 0,00024 \left(1 + \frac{0,25}{R} \right) = 0,00024 + \frac{0,00006}{R} \text{ въ метрахъ;} \\ &= 0,0000731 \left(1 + \frac{0,82}{R} \right) = 0,0000731 + \frac{0,00006}{R} \text{ въ футахъ;} \\ &= 0,000512 \left(1 + \frac{0,117}{R} \right) = 0,000512 + \frac{0,00006}{R} \text{ въ саженьяхъ.} \end{aligned}$$

Для руселъ земляныхъ:

$$\alpha = 1 + 210 A = 1,0588 + \frac{0,00735}{R} \text{ въ метрахъ;}$$

$$\begin{aligned}\alpha &= 1 + 688,8 A = 1,0588 + \frac{0,241}{R} \text{ въ футахъ;} \\ &= 1 + 984,27 A = 1,0588 + \frac{0,0345}{R} \text{ въ саженьяхъ.}\end{aligned}$$

Для русель, покрытыхъ грубо-околотымъ камнемъ:

$$\begin{aligned}\alpha &= 1 + 210 A = 1,05 + \frac{0,00126}{R} \text{ въ метрахъ;} \\ &= 1 + 688,8 A = 1,05 + \frac{0,0041}{R} \text{ въ футахъ;} \\ &= 1 + 984,27 A = 1,05 + \frac{0,00585}{R} \text{ въ саженьяхъ.}\end{aligned}$$

За симъ $A = \frac{1}{C^2}$, причеъ по Гангиле и Куттеру

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{i}}{a + \left(23 + \frac{0,00155}{i} \right) \frac{n}{\sqrt{R}}},$$

гдѣ i — уклонъ поверхности потока,

$n = 0,017$ для русель, покрытыхъ грубо-околотымъ камнемъ,

$= 0,025$ для русель земляныхъ,

$= 0,030$ для русель съ крупными наносами и водорослями,

$a = 1$ для исчисленій въ метрахъ,

$= 0,55$ для исчисленій въ футахъ,

$= 1,461$ для исчисленій въ саженьяхъ.

Необходимо замѣтить, что для земляныхъ русель

при $i = 0,00155$ и $R = 1$ метру,

а также при $i < 0,001$ и $R < 6$ метровъ

коэффициенты Гангиле и Куттера даютъ результаты почти тождественные съ результатами коэффициентовъ Дарси-Базена; внѣ же послѣднихъ предѣловъ результаты коэффициентовъ Гангиле и Куттера значительно уклоняются отъ таковыхъ Дарси-Базена и вообще соответствуютъ наблюденіямъ Гумфрейса и Аббота на рѣкѣ Миссисипи.

Для практическаго опредѣленія коэффициента C изъ наблюденій для данной рѣки можно принимать, какъ показали изслѣдованія инженера Гардера на Эльбѣ

$$C = K_1 + K_2 \sqrt{R},$$

гдѣ K_1 и K_2 числовыя величины.

Уравненію 2-му можетъ быть приданъ видъ:

$$dy = \alpha \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v^2}{2g} \right) ds + A \frac{v^2 p}{\Omega} \cdot ds \dots \dots \dots (3)$$

или такъ какъ $v = \frac{Q}{\Omega}$

$$dy = \frac{\alpha \cdot Q^2}{2g} \cdot \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{\Omega^2} \right) ds + A \frac{p Q^2}{\Omega^3} ds \dots \dots \dots (4)$$

Изъ ур. 4-го для нѣкотораго конечнаго элемента потока длиною λ съ однообразнымъ движеніемъ, имѣющаго въ началѣ живое сѣченіе Ω_0 и подводный периметръ p_0 , а въ концѣ — живое сѣченіе Ω_1 и подводный периметръ p_1 , получаемъ паденіе поверхности приблизительно:

$$z = \int_s^{(s+\lambda)} dy = Q^2 \left\{ \frac{\alpha}{2g} \left(\frac{1}{\Omega_1^2} - \frac{1}{\Omega_0^2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{p_0 A_0}{\Omega_0^3} + \frac{p_1 A_1}{\Omega_1^3} \right) \lambda \right\} \dots (5)$$

За симъ, такъ какъ

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{\Omega^2} \right) = \frac{-2 \partial \Omega}{\Omega^3 \partial s};$$

то уравненіе 4-е даетъ:

$$dy = - \frac{\alpha Q^2}{g} \cdot \frac{\partial \Omega}{\Omega^3} + A p \frac{Q^2}{\Omega^3} ds \dots \dots \dots (6)$$

Если площадь начальнаго живого сѣченія есть Ω_0 , то начальная скорость движенія потока есть

$$v_0 = \frac{Q}{\Omega_0} \dots \dots \dots (7)$$

и скорость его движенія въ концѣ безконечно малаго элемента ds , очевидно, будетъ:

$$v = \frac{Q}{\Omega} = \frac{Q}{\Omega_0 + \partial \Omega} \dots \dots \dots (8)$$

Изъ сопоставленія выраженій 7 и 8 видно: что $v = v_0$, т. е. потокъ имѣть движеніе *равномѣрное*, если $\partial \Omega = 0$; что $v > v_0$, т. е. потокъ имѣть движеніе *ускоренное*, если $\partial \Omega < 0$ и что $v < v_0$, т. е. потокъ имѣть движеніе *замедленное*, если $\partial \Omega > 0$.

Съ другой стороны, если $\partial \Omega = 0$; то $\Omega = \Omega_0$ и уравненіе 6-е даетъ

$$A p Q^2 = \Omega_0^3 \frac{\partial y}{\partial s} \dots \dots \dots (9)$$

Уравненіе 9-е есть уравненіе *равномѣрнаго* движенія потока и, такъ какъ ds

есть элементъ длины потока, а dy есть вертикальное паденіе поверхности потока на этомъ элементѣ, то $\frac{dy}{ds} = i_0$ есть синусъ угла, составляемаго поверхностью потока съ горизонтомъ, или уклонъ поверхности потока къ горизонту, слѣд. уравненіе 9-е можетъ быть написано такъ

$$Ap Q^2 = \Omega_0^3 i_0 \dots \dots \dots (10)$$

Если мы обозначимъ ширину русла по урѣзу воды чрезъ l и среднюю глубину живого сѣченія чрезъ h , то

$$\Omega = lh$$

и слѣд.

$$\partial \Omega = l \partial h + h \partial l \dots \dots \dots (11)$$

Въ случаѣ русла *призматическаго*, т. е. ограниченнаго въ урѣзѣ воды параллельными линіями, или *безконечно широкаго*

$$\partial \Omega = l \partial h \dots \dots \dots (12)$$

и, при движеніи потока равномерномъ, т. е. при $\partial \Omega = 0$, $\partial h = 0$; а слѣд. h сохраняетъ постоянную величину и уклонъ поверхности потока i_0 равенъ уклону дна русла.

Если мы обозначимъ вообще: уклонъ поверхности потока въ сторону его движенія чрезъ i , его среднюю глубину въ начальномъ сѣченіи чрезъ h_0 и въ концѣ элемента ds — чрезъ h , а уклонъ дна русла чрезъ i_1 и при томъ со знакомъ (+), если онъ направленъ въ сторону движенія потока и со знакомъ (—), если онъ направленъ въ обратную сторону; то будемъ имѣть:

$$dy = i ds \dots \dots \dots (13)$$

$$h - h_0 = \partial h = (i_1 - i) ds, \dots \dots \dots (14)$$

для i_1 направленнаго въ сторону движенія и

$$h - h_0 = \partial h = - (i_1 + i) ds \dots \dots \dots (15)$$

для i_1 направленнаго въ обратную сторону.

Изъ уравненій 11, 13 и 14 имѣемъ:

$$\partial \Omega = l (i_1 - i) ds + h \partial l \dots \dots \dots (16)$$

и

$$dy = i ds = i_1 ds + \frac{h \partial l}{l} - \frac{\partial \Omega}{l} \dots \dots \dots (17)$$

Изъ уравненій 17 и 6 получаемъ:

$$\frac{\partial \Omega}{ds} = \frac{l \left(i_1 + \frac{h \partial l}{l ds} - \frac{Ap Q^2}{\Omega^3} \right)}{1 - \frac{\alpha Q^2 l}{g \Omega^3}} \dots \dots \dots (18)$$

или вставляя вмѣсто ApQ^2 его величину изъ уравненія 10-го

$$\frac{\partial \Omega}{\partial s} = \frac{l \left(i_1 + \frac{h \partial l}{l \partial s} - i_0 \frac{\Omega_0^3}{\Omega^3} \right)}{1 - \frac{\alpha Q^2 l}{g \Omega^3}} \dots \dots \dots (19)$$

или такъ какъ $\Omega = lh$ и $Q = v\Omega$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial s} = \frac{l \left(i_1 + \frac{h \partial l}{l \partial s} - i_0 \frac{\Omega_0^3}{\Omega^3} \right)}{1 - \frac{\alpha v^2}{gh}} \dots \dots \dots (20)$$

Изъ уравненія 20-го видно, что равномерное движеніе возможно, т. е. возможны условія $\Omega_0 = \Omega$ и $\partial \Omega = 0$, если

$$i_1 + \frac{h \partial l}{l \partial s} = i_0 = \frac{Ap Q^2}{\Omega_0^3} \dots \dots \dots (21)$$

Если условіе 21 удовлетворено, то уравненію 20-е можетъ быть написано такъ:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial s} = \frac{l \left(i_1 + \frac{h \partial l}{l \partial s} \right) \left(1 - \frac{\Omega_0^3}{\Omega^3} \right)}{1 - \frac{\alpha v^2}{gh}} \dots \dots \dots (22)$$

Изъ уравненія 22 видно, что ускоренное движеніе, которому соотвѣтствуютъ условія $\partial \Omega < 0$ и $\Omega_0 > \Omega$ и замедленное движеніе, которому соотвѣтствуютъ условія $\partial \Omega > 0$ и $\Omega_0 < \Omega$, — возможны лишь при условіи $\frac{\alpha v^2}{gh} < 1$ или $v^2 < \frac{gh}{\alpha}$ и что, при $v^2 = \frac{gh}{\alpha}$, $\frac{\partial \Omega}{\partial s} = \infty$.

Отсюда слѣдуетъ, что, при $v^2 \equiv \frac{gh}{\alpha}$, все, что можетъ замедлять или ускорять движеніе потока, нарушаетъ его установившееся движеніе и вмѣсто замедленія вызываетъ внезапный *прижокъ* (подъемъ) воды вверхъ, а вмѣсто ускоренія внезапный *перепадъ* воды внизъ.

Если мы скажемъ, что для сохраненія однообразнаго установившагося движенія потока и для возможности преобразованія его въ другое однообразное движеніе необходимо условіе

$$v^2 = \frac{gh}{n\alpha},$$

или что то-же

$$Q^2 = \frac{gh \Omega^2}{n\alpha}, \dots \dots \dots (23)$$

гдѣ $n > 1$, то умножая обѣ части равенства 23 на $\frac{Ap}{\Omega^3}$ получимъ:

$$\frac{Ap Q^2}{\Omega^3} = \frac{Apgh}{n\alpha \Omega} = \frac{Ap g}{n\alpha l}, \dots \dots \dots (24)$$

а соединяя уравненія 24-е съ 21-мъ получаемъ

$$i_1 + \frac{h \partial l}{\partial s} = \frac{Ap g}{n\alpha l}, \dots \dots \dots (25)$$

откуда

$$i_1 = \frac{Ap g}{n\alpha l} - \frac{h \partial l}{\partial s} \dots \dots \dots (26)$$

или

$$i_1 < \frac{Ap g}{\alpha l} - \frac{h \partial l}{\partial s} \dots \dots \dots (27)$$

есть та величина уклона русла, при коей сохраненіе установившагося движенія или преобразованіе одного однообразнаго движенія потока въ другое безъ прыжка, или перепада возможны.

Вставляя въ уравненіе 26-е значеніе n изъ ур. 23 можно написать уравненіе 26-е такъ:

$$i_1 = \frac{Ap \cdot v^2}{lh} - \frac{h \partial l}{\partial s} \dots \dots \dots (27)$$

и для русла призматическаго и очень широкаго, при небольшой глубинѣ потока сравнительно съ шириной

$$i_1 = \frac{Av^2}{h} \dots \dots \dots (28)$$

гдѣ

$$v^2 < \frac{gh}{\alpha}.$$

Основное уравненіе 2-е выведено на основаніи закона живыхъ силъ и въ предположеніи параллельности струй потока. Буссинескъ *), исходя изъ того положенія, что струи потока непараллельны и подвержены вихревымъ движеніямъ и примѣняя законъ живыхъ силъ къ группамъ струй мало-отклоняющихся, при помощи нѣкоторыхъ вѣроятныхъ предположеній, упрощающихъ выраженія, пришелъ къ тому же уравненію 6-му, но при этомъ выяснилъ, что уравненія 6-е и изъ него вытекающія, могутъ быть признаны вѣрными лишь для случаевъ, когда численная величина

$$\frac{\partial \Omega}{\partial s} < 0,03. \dots \dots \dots (29)$$

*) „Essai sur la théorie des eaux courantes“ par Poussinesq. 1877.

Для участка потока небольшой длины λ , удовлетворяющего условию неравенства 29-го, т. е. условию $\frac{(\Omega_0 - \Omega_1)}{l_0 \lambda} < 0,03$, гдѣ l_0 есть наименьшая ширина русла по поверхности воды, уравненіе 5-е даетъ возможность опредѣлить:

- 1) Расходъ воды Q по данному z и прочимъ даннымъ величинамъ.
- 2) Поверхность потока, если даны:
 - а) расходъ воды Q ,
 - б) уклонъ дна $\pm i_1$, при чемъ $(+)$ соответствуетъ направленію уклона по теченію—внизъ, а $(-)$ вверхъ,
 - в) поперечныя сѣченія русла и высота воды въ одномъ изъ нихъ.

Для сего обозначить возвышенія воды надъ дномъ русла вообще чрезъ h , въ начальномъ верховомъ сѣченіи чрезъ h_0 и въ конечномъ чрезъ h_1 можно написать выраженія $\Omega = f(h)$ и $p = F(h)$, въ коихъ видѣ функцій f и F извѣстенъ по даннымъ сѣченіямъ русла, и выразить значеніе z такъ:

$$z = h_0 - h_1 \pm i_1 \lambda \dots \dots \dots (30)$$

При этомъ уравненіе 5-е даетъ:

$$h_0 - h_1 \pm \lambda i_1 = Q^2 \left\{ \frac{\alpha}{2g} \left(\frac{1}{f(h_1)^2} - \frac{1}{f(h_0)^2} \right) + \frac{A}{2} \left(\frac{F(h_0)}{f(h_0)^3} + \frac{F(h_1)}{f(h_1)^3} \right) \lambda \right\}. \quad (31)$$

Если предположимъ, что дана высота воды h_1 , то будутъ извѣстны:

$$f(h_1) = \Omega_1 \text{ и } F(h_1) = p_1$$

и уравненіе 31-е дастъ:

$$h_0 - h_1 \pm \lambda i_1 = Q^2 \left\{ \frac{\alpha}{2g} \left(\frac{1}{\Omega_1^2} - \frac{1}{f(h_0)^2} \right) + \frac{A}{2} \left(\frac{F(h_0)}{f(h_0)^3} + \frac{p_1}{\Omega_1^3} \right) \lambda \right\}, \quad (32)$$

откуда, принимая α и A соответственно извѣстному сѣченію Ω_1 , по приближенію, можетъ быть опредѣлена величина h_0 .

Точно также по данной величинѣ h_0 изъ ур. 31 опредѣляется величина h_1 .

Изъ уравненія же 30-го по извѣстнымъ величинамъ h_0 и h_1 опредѣляется паденіе поверхности воды.

Гидродинамическіе элементы рѣчныхъ потоковъ отличаются нѣкоторыми слѣдующими особенностями, имѣющими весьма большое значеніе.

Поперечныя сѣченія русла рѣчныхъ потоковъ всегда имѣютъ болѣе или менѣе неправильныя криволинейныя очертанія дна и откосовъ, зависящія какъ отъ случайностей естественнаго поперечнаго рельефа долины, такъ и отъ неравномѣрнаго размывающаго дѣйствія воды и всегда значительно больше развиты въ ширину, чѣмъ

въ глубину. Вслѣдствіе сего въ рѣчныхъ потокахъ, во 1-хъ, проявляется разнообразная и довольно сложная зависимость между расходами воды и глубинами живыхъ сѣченій, во 2-хъ, живыя сѣченія имѣютъ глубины всегда незначительныя сравнительно съ ихъ ширинами по урѣзу воды; а именно: въ большинствѣ случаевъ глубины имѣютъ величину меньшую $\frac{1}{40}$ доли ширины живыхъ сѣченій по урѣзу воды.

При опредѣленіи соотношенія расходовъ воды и глубинъ живыхъ сѣченій или высотъ воды, принимаются глубины или возвышенія воды надъ *среднимъ дномъ* русла. Эти возвышенія воды опредѣляются слѣдующимъ образомъ. Въ изслѣдуемомъ мѣстѣ рѣки измѣряется площадь живаго сѣченія потока при наинизшемъ меженнемъ горизонтѣ и раздѣленіемъ этой площади на ширину живаго сѣченія по урѣзу воды опредѣляется *средняя глубина* его. Прибавленіемъ къ найденной *средней глубинѣ* наименьшаго живаго сѣченія наблюдаемыхъ возвышеній воды надъ *наинизшимъ меженнымъ* горизонтомъ получаются искомыя возвышенія надъ *среднимъ дномъ*.

По изслѣдованіямъ Ломбардини (произведеннымъ въ Италіи въ первой половинѣ настоящаго столѣтія) зависимость расходовъ и высотъ воды надъ среднимъ дномъ выражается:

Для рѣки Адда у озера Комо:

$$Q = 100 h^{3/2} (1 - 0,032 h),$$

гдѣ Q — расходъ въ куб. метрахъ,

h — высота воды надъ среднимъ дномъ въ метрахъ.

Для рѣки По между Понте Лагоскюро и Фосса д'Альберто, при тѣхъ же обозначеніяхъ, поверхностномъ уклонѣ i и ширинѣ живаго сѣченія l въ метрахъ:

$$Q = mlh^{3/2} \sqrt{i},$$

гдѣ

$1000 i = 0,115 - 0,00069 h^2$, и $ml = 767 \sqrt{1000}$
а слѣд.

$$Q = 767 h^{3/2} \sqrt{0,115 - 0,00069 h^2}.$$

Пользуясь этими формулами и 10-лѣтними наблюденіями горизонтовъ воды, Ломбардини, между прочимъ, вычислилъ модули рѣкъ Адда и По у названныхъ мѣстъ.

Вслѣдъ за Ломбардини французскій инженеръ Баумгартенъ искалъ выраженія зависимости расходовъ отъ высотъ воды въ рѣкѣ Гароннѣ у Тоннена по формулѣ

$$Q = m \cdot h^2 \cdot \sqrt{i}$$

и для измѣреній въ метрахъ нашелъ, что:

$$m = 125 \text{ и } i = -0,094 + 0,201 h - 0,044 h^2 + 0,003 h^3.$$

За симъ французскій инженеръ Фаргъ въ своихъ изслѣдованіяхъ р. Гаронны, опубликованныхъ въ 1868 г., полагалъ, что зависимость расходовъ и высотъ воды можетъ быть выражена уравненіемъ:

$$Q = \alpha + \beta h + \gamma h^2,$$

т. е. уравненіемъ параболы, ось коей параллельна оси абсциссъ или величинамъ Q и, на основаніи произведенныхъ измѣреній на р. Гароннѣ у Лангона, по способу наименьшихъ квадратовъ, для измѣній въ метрахъ, вычислилъ коэффициенты α , β и γ , причемъ получилъ выраженіе:

$$Q = 86,518 + 120,184 h + 41,698 h^2.$$

Формула эта, по заявленію Фарга, давала результаты, вполне совпадающіе съ измѣреніями въ тѣхъ предѣлахъ горизонтовъ воды, въ коихъ были произведены измѣренія, послужившія основаніемъ для вычисленія ея коэффициентовъ; но примѣненіе ея къ болѣе высокимъ горизонтамъ давало поводъ думать, что соотношеніе расходовъ и высотъ воды можно было бы лучше выразить формулой вида

$$Q = M \cdot h^{3/2}.$$

Нѣкоторые изслѣдованія, произведенныя въ Германіи въ ближайшее къ намъ время, приводятъ къ заключенію, что искомое соотношеніе расходовъ и высотъ воды иногда можетъ быть приблизительно выражаемо уравненіемъ параболы 2-го порядка, вида

$$Q = M \cdot h^2.$$

Формула вида, предложеннаго Ломбардини для р. По, заслуживаетъ наибольшаго вниманія, потому что она выводится изъ урав-

ненія движенія воды *). Для приблизительнаго изслѣдованія, полагая i постояннымъ, можно пользоваться сокращеннымъ видомъ этой формулы

$$Q = M \cdot h^{3/2}.$$

Продольный уклонъ поверхности рѣчнаго потока представляет собою нѣкоторую ломаную кривую, общее наклоненіе коей къ горизонту обыкновенно уменьшается отъ верховьевъ къ устью рѣки и отдѣльные элементы коей имѣютъ разныя наклоненія къ горизонту въ сторону устья.

Если рѣка беретъ начало въ горныхъ скатахъ и опускается постепенными склонами къ своему устью, встрѣчая по пути болѣе или менѣе одинаково размываемыя породы, то общій уклонъ поверхности ея потока уменьшается къ устью съ небольшими изломами постепенно, и въ немъ различаются три области: область горная или весьма быстрого теченія и водопадовъ, область средняя—быстрого теченія и область низменная—тихаго спокойнаго теченія.

По мѣрѣ размыва русла границы этихъ областей подвигаются къ верховью, такъ что область *низменная*, спокойнаго теченія, постепенно развивается на счетъ области быстрого, а область быстрого—на счетъ области горной, и въ результатъ получается нѣкоторое постепенное уменьшеніе уклоновъ въ низменной области и нѣкоторое увеличеніе ихъ въ горной.

Рѣки, берущія начало на плоскихъ возвышенностяхъ и въ котловинахъ, не имѣютъ горныхъ областей; нѣкоторыя же рѣки второстепенныя (впадающія въ другія рѣки), иногда не имѣютъ низменныхъ областей. Наконецъ рѣки, встрѣчающія на пути своего русла террасы или твердыя неразмываемыя породы (пороги), имѣютъ крутые поверхностные уклоны, быстротоки и водопады на границахъ среднихъ и низменныхъ областей своихъ, а иногда и въ нѣкоторыхъ мѣстахъ этихъ областей.

*) Если мы представимъ себѣ небольшой участокъ рѣки съ однообразными и мало разнящимися живыми сѣченіями, то въ уравненіи движенія воды можемъ принять $dv = 0$ и будемъ имѣть $dy = \frac{Av^2}{R} \cdot ds$ или $Ri = Av^2$, такъ, какъ $\frac{dy}{ds} = i$; затѣмъ для даннаго сѣченія можетъ быть принято $R = \xi h$, а слѣдов. $v^2 = \frac{R \cdot i}{A} = \frac{\xi \cdot h \cdot i}{A} = n h i$, откуда $v = \sqrt{n \cdot h \cdot i}$ и $Q = v \Omega = n_1 h \sqrt{n h i} = m h^{3/2} \sqrt{i}$.

Изломы кривой поверхностного уклона рѣчного потока во всѣхъ областяхъ его происходятъ еще отъ того, что потокъ на пути своемъ встрѣчаетъ послѣдовательныя неравномѣрныя уширенія и суженія долины, а также различныя сопротивленія грунтовъ размыву и выработываетъ въ нихъ себѣ русло, неодинаково развитое въ разныхъ мѣстахъ въ ширину и глубину. Измѣненія въ продольномъ поверхностномъ уклонѣ потока въ зависимости отъ измѣненій ширины и глубины его русла весьма наглядно показываются нижеслѣдующими опытами, произведенными въ Роаннѣ въ 1847 году французскимъ инженеромъ Вотье надъ искусственными руслами.

Въ искусственное прямоугольное русло съ боковыми уширеніями (черт. 1), закрываемыми щитами, была пущена вода при закрытыхъ щитахъ — потокъ получилъ прямолинейный поверхностный уклонъ, параллельный уклону дна русла, показанный на чертежѣ 2-мъ пунктирною линією; щиты, закрывающіе уширенія, были осторожно вынуты, дѣйствіе общаго уширенія русла проявилось, и потокъ получилъ поверхностный уклонъ, показанный на чертежѣ 2-мъ кривою сплошною.

Въ мѣстѣ самого большого уширенія того же русла на дно его была поставлена осторожно небольшая перемычка, и поверхностный уклонъ потока принялъ видъ, показанный на чертежѣ 3-мъ кривою.

Въ руслѣ съ уширеніемъ (черт. 4) поставлена была продольная перегородка fh , дѣлящая его на два равныхъ по ширинѣ рукава, причемъ съ помощью подвижной части перегородки эта могла быть сопряжена съ правымъ берегомъ. Когда перегородка была сопряжена съ правымъ берегомъ (подвижная часть ея находилась въ положеніи fg), поверхностный уклонъ потока въ лѣвомъ рукавѣ имѣлъ видъ, показанный пунктирной прямой (черт. 5), съ небольшимъ лишь перепадомъ у низоваго конца перегородки, а въ правомъ рукавѣ вода стояла на горизонтальномъ уровнѣ, соотвѣтствующемъ концу лѣваго рукава; когда же перегородка была выпрямлена (подвижная часть ея была поставлена въ положеніи fg') въ обоихъ рукавахъ поверхностный уклонъ потока принялъ видъ, показанный на чертежѣ 5 сплошной кривою линією.

Такія же измѣненія поверхностныхъ уклоновъ имѣютъ мѣсто и въ естественныхъ рѣчныхъ потокахъ, но нужно сказать, что въ натурѣ они вообще проявляются въ менѣе рѣзкомъ масштабѣ, причемъ

подъемы уклоновъ въ сторону, обратную теченію, встрѣчаются довольно рѣдко, на самыхъ малыхъ протяженіяхъ и носятъ преимущественно характеръ временный.

Поверхностные уклоны рѣчныхъ потоковъ вообще достигаютъ слѣдующихъ величинъ:

въ горныхъ	областяхъ	отъ	$\frac{7}{10000}$	до	$\frac{6}{100}$
въ порогахъ	»		$\frac{1}{1000}$	до	$\frac{5}{1000}$
въ среднихъ	областяхъ	»	$\frac{1}{100000}$	до	$\frac{7}{10000}$
и въ низменныхъ	»	»	$\frac{1}{100000}$	и менѣе до	$\frac{1}{1000000}$

Зависимость высотъ воды отъ расходовъ и одновременныя измѣненія самихъ расходовъ въ послѣдовательныхъ (болѣе или менѣе удаленныхъ другъ отъ друга) сѣченіяхъ рѣчнаго потока, не бываютъ одинаковы; поэтому одновременные подъемы горизонтовъ воды въ послѣдовательныхъ живыхъ сѣченіяхъ рѣки вообще бываютъ не равны между собою, и вслѣдствіе сего уклоны поверхности потока въ одномъ и томъ же участкѣ рѣки, при измѣненіяхъ расходовъ и горизонтовъ воды, измѣняются и притомъ весьма разнообразно: съ подъемомъ горизонта воды, уклоны иногда увеличиваются, иногда же, наоборотъ, уменьшаются.

Средняя скорость струй воды въ какомъ-либо живомъ сѣченіи рѣчнаго потока можетъ быть разсматриваема или какъ функція дѣйствительныхъ скоростей отдѣльныхъ струй и площади живаго сѣченія, или какъ функція той живой силы, съ которою масса воды подходит къ живому сѣченію.

Въ первомъ случаѣ средняя скорость вообще выражается уравненіемъ:

$$v = \frac{\sum u \cdot w}{\Omega},$$

гдѣ u — скорости отдѣльныхъ струй,

w — части площади живаго сѣченія, имъ соотвѣтствующія,

Ω — общая площадь живаго сѣченія.

Во второмъ случаѣ, по принципамъ гидравлики и соображаясь съ изслѣдованіями Ломбардини, средняя скорость вообще выражается уравненіемъ $v = \varphi \sqrt{hi}$ *).

гдѣ φ —нѣкоторый коэффициентъ, соответствующій данному участку и данному сѣченію потока,

h —высота воды надъ среднимъ дномъ даннаго живаго сѣченія,

i —продольный уклонъ поверхности подходящей къ данному сѣченію воды, соответствующей высотѣ воды h .

Изъ этого уравненія видно, что средняя скорость живаго сѣченія рѣчнаго потока возрастаетъ при увеличеніи высотъ воды и соответствующемъ увеличеніи уклоновъ, убываетъ при уменьшеніи высотъ и уклоновъ и можетъ возрастать или убывать при увеличеніи высотъ и связанномъ съ нимъ уменьшеніи уклоновъ, смотря потому, въ какой степени уменьшаются уклоны въ связи съ увеличеніемъ высотъ.

Частицы воды, какъ извѣстно, проявляютъ между собою и въ прикосновеніи съ твердыми тѣлами нѣкоторую силу прилипанія (сцѣпленія), и, вслѣдствіе существованія этой силы, всякій водный потокъ встрѣчаетъ въ своемъ руслѣ сопротивленіе движенію. Сопротивленіе проявляется на поверхности соприкасанія потока съ русломъ (по подводному периметру) и передается внутрь его массы отдѣльнымъ струямъ, постепенно уменьшаясь по нѣкоторому закону; вслѣдствіе этого скорости отдѣльныхъ струй потока не равны между собою, а по нѣкоторому закону растутъ отъ подводнаго периметра русла внутрь массы потока до нѣкоторой его оси, которую можно назвать *динамическою* осью потока, и въ этой оси имѣютъ наибольшую величину.

Произведенными изслѣдованіями доказано, что въ каждомъ живомъ сѣченіи рѣчнаго потока скорости измѣняются въ вертикальномъ и горизонтальнымъ направленіяхъ по нѣкоторымъ кривымъ, которые

*) Подводный радіусъ живаго сѣченія рѣки можно принимать $\frac{\Omega}{p} = h$. Если Ω есть средняя величина площади живаго сѣченія между величинами Ω_0 и Ω_1 на участкѣ длиною λ съ паденіемъ поверхности z и уклонами $i = \frac{z}{\lambda}$; то, по ур. 5 и условію $Q = Q_0$,

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{\frac{\alpha \Omega^2 h}{2g\lambda} \left(\frac{1}{\Omega_1^2} - \frac{1}{\Omega_0^2} \right) + \frac{\Omega^2 h}{2} \left(\frac{A_0}{\Omega_0^2 h_0} + \frac{A_1}{\Omega_1^2 h_1} \right)}}.$$

можно принимать за параболы 2-го порядка; причемъ вертикальная парабола *наибольшихъ скоростей* находится въ вертикальной плоскости, проходящей черезъ *динамическую ось* потока и пересѣкающей подводный периметръ русла (въ большинствѣ случаевъ, если въ очертаніи его нѣтъ никакихъ особыхъ неправильностей) въ самой пониженной точкѣ, т. е. въ точкѣ наибольшей глубины живаго сѣченія; ось сей параболы совпадаетъ съ динамическою осью потока, которая всегда помѣщается въ предѣлахъ верхней трети глубины живаго сѣченія и тѣмъ ближе къ поверхности воды, чѣмъ меньше глубина; такъ что въ потокахъ глубокихъ она находится на $\frac{1}{3}$ глубины ниже поверхности воды, въ потокахъ же мелкихъ почти у самой поверхности воды (черт. 6 и 7).

Отъ вертикальной *плоскости наибольшихъ скоростей* скорости убываютъ въ горизонтальныхъ направленіяхъ въ обѣ стороны къ берегамъ по параболамъ, оси коихъ находятся въ *плоскости наибольшихъ скоростей*, и вершины коихъ находятся въ точкахъ *параболы наибольшихъ скоростей* (черт. 8). Такимъ образомъ общее измѣненіе скоростей отдѣльныхъ струй въ живомъ сѣченіи рѣчнаго потока происходитъ по поверхности нѣкоего параболлоида. Пересѣченіе этой поверхности вертикальными плоскостями, параллельными плоскости живаго сѣченія, даютъ кривыя равныхъ скоростей, называемыя *изотаксами* (черт. 9).

Въ живыхъ сѣченіяхъ правильныхъ, симметричныхъ относительно середины, кривыя равныхъ скоростей (изотаксы) концентричны и имѣютъ общій центръ въ динамической оси потока; въ большинствѣ же случаевъ въ рѣчныхъ потокахъ, подъ вліяніемъ неправильностей русла, концентричность изотаксъ болѣе или менѣе нарушается, и въ очертаніяхъ ихъ замѣчаются неправильные изгибы.

Для русла прямоугольнаго безконечной ширины, изотаксы обращаются въ горизонтальныя прямыя, и для сего случая французскій инженеръ Базенъ, на основаніи произведенныхъ опытовъ въ каналахъ небольшой глубины, далъ слѣдующую формулу, выражающую зависимость между наибольшею скоростью (на поверхности воды) V_{max} и V_x на нѣкоторой глубинѣ x отъ поверхности воды:

$$V_{max} - V_x = K \cdot \sqrt{H \cdot i} \cdot \left(\frac{x}{H} \right)^2 \dots \dots \dots (a)$$

гдѣ H —глубина живаго сѣченія русла,
 i —уклонъ поверхности воды,

гдѣ K —коэффициентъ; при измѣреніяхъ:

въ метрахъ $K = 24$

въ футахъ $K = 43,464$

въ саженьяхъ $K = 15,43$.

Формула эта можетъ быть примѣнима для приближительнаго выраженія зависимости между скоростями большихъ рѣчныхъ потоковъ малой глубины (сравнительно съ шириною) въ плоскости динамической оси.

Средняя скорость v , по наблюденіямъ того же инженера, въ земляныхъ руслахъ составляетъ около 0,6 наибольшей скорости V_{max} , и зависимость между ними выражается формулой

$$V_{max} - v = K_1 V \overline{R.i}. \quad (6)$$

гдѣ i —уклонъ поверхности потока,

R —подводный радіусъ,

K_1 —коэффициентъ; при измѣреніяхъ:

въ метрахъ $K_1 = 14$

въ футахъ $K_1 = 25,35$

въ саженьяхъ $K_1 = 9,57$.

Если мы представимъ себѣ рѣчной потокъ-большой ширины и малой глубины, въ коемъ можемъ предположить наибольшую скорость на поверхности и, кромѣ того, принять $R = H = h$ —средней глубинѣ, то изъ формулъ Базена (а) и (б) получимъ слѣдующую зависимость между средней скоростью v и скоростью V_x въ плоскости динамической оси:

$$v - V_x = \left[K \frac{x^2}{h^2} - K_1 \right] V \overline{h.i}.$$

Если мы предположимъ $x = h$, т. е. что V_x есть скорость на днѣ и обозначимъ ее черезъ V_h , то будемъ имѣть

$$v - V_h = (K - K_1) V \overline{h.i},$$

а такъ какъ

$$v = \varphi V \overline{h.i}, \text{ то } V_h = (\varphi - K + K_1) V \overline{h.i}.$$

Изъ формулы (а) также будемъ имѣть:

$$V_{max} - V_h = K V \overline{h.i} \text{ и } V_h = V_{max} - K V \overline{h.i}.$$

Среднія скорости въ рѣчныхъ потокахъ вообще бываютъ слѣдующихъ величинъ:

при теченіи слабѣе 2 ф. въ 1 секунду,

» » умѣренномъ отъ 2—4 футовъ,

» » быстромъ отъ 4—10 футовъ,

и въ порогахъ достигаютъ 15 футовъ и болѣе.

§ 3. Общія свойства движенія рѣчнаго потока.

Взаимно соприкасающіяся и связанныя между собой нѣкоторымъ сдѣленіемъ, но въ то же время обладающія разными поступательными скоростями струи потока не могутъ остаться въ состояніи одного поступательнаго движенія; въ немъ, неизбѣжно, разностью скоростей вызываются вращательныя движенія, и въ результатѣ соединенія двухъ движеній получается стремленіе элементовъ струй идти не *параллельно*, а *катиться* по нѣкоторымъ *вихревымъ* линіямъ, *вихревымъ* поверхностямъ, то приближающимся, то удаляющимся другъ отъ друга. Наглядныя наблюденія показываютъ, что въ открытыхъ руслахъ вихревыя линіи струй, отражаясь отъ дна русла вверхъ и отъ боковъ его къ срединѣ, имѣютъ стремленіе приближаться къ динамической оси потока и что стремленіе это тѣмъ устойчивѣе, чѣмъ болѣе сжатъ потокъ, т. е. чѣмъ больше въ немъ гидростатическое давленіе и тѣмъ сильнѣе, чѣмъ больше средняя скорость его движенія. Въ болѣе или менѣе сжатыхъ потокахъ, текущихъ въ правильныхъ руслахъ, стремленіе струй къ динамической оси приближаетъ ихъ къ параллелизму и въ то же время порождаетъ нѣкоторое, вообще небольшое, возвышеніе горизонта воды надъ динамическою осью (имѣющее тѣмъ большую величину, чѣмъ больше средняя скорость потока); причемъ отъ плоскости динамической оси къ берегамъ горизонтъ воды постепенно понижается по параболическому закону, такъ что поверхность воды въ живомъ сѣченіи такого потока имѣетъ видъ нѣкоторой параболы, ось коей вертикальна и проходитъ черезъ динамическую ось потока. Въ потокахъ же не сжатыхъ замѣчается, напротивъ, постоянно мѣняющееся распределеніе вихревыхъ линій, какъ бы раздѣленіе всего потока на массу сталкивающихся и колеблющихся отдѣльныхъ группъ струй, отдѣльныхъ потоковъ, имѣющихъ каждый свою динамическую ось.

Къ потокамъ вполне сжатымъ относятся потоки въ водопроводныхъ трубахъ и въ открытыхъ водопроводныхъ руслахъ, имѣющіе такія живыя сѣченія, глубина коихъ не менѣе $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{4}$ ширины.

Такіе потоки движутся струями почти параллельными. Рѣчные же потоки, имѣющіе вообще незначительныя сравнительно съ шириною глубины, представляются потоками слабо-сжатыми и болѣе или менѣе приближаются къ состоянію потоковъ сжатыхъ, параллельно-струйныхъ, преимущественно подъ вліяніемъ бокового сжимающаго дѣйствія центробѣжной силы, т. е. въ криволинейныхъ своихъ частяхъ.

Такъ какъ извѣстныя уравненія гидродинамики могли быть выведены лишь въ предположеніи совершенно или почти параллельно-струйнаго движенія потоковъ, и такъ какъ всѣ особенности вихревыхъ движеній въ рѣчныхъ потокахъ не поддаются ни анализу, ни точному наблюденію; то дѣлается совершенно понятнымъ, почему не представляется возможнымъ сверхъ вышеприведенныхъ формулъ дать болѣе точныя выраженія какъ законовъ распредѣленія скоростей въ рѣчныхъ потокахъ, такъ и общихъ условій ихъ движенія.

Поэтому всѣ вышеприведенныя формулы могутъ служить лишь для приблизительнаго уясненія нѣкоторыхъ явленій въ движеніи рѣчныхъ потоковъ, но не для точнаго рѣшенія вопросовъ этого движенія.

Тѣмъ не менѣе естественному быту каждой рѣки, въ связи съ грунтовыми, топографическими и проч. условіями ея бассейна, присуща всегда нѣкоторая опредѣленная совокупность гидродинамическихъ элементовъ, и каждая рѣка вырабатываетъ себѣ русло въ планѣ и продольной профили, соотвѣтствующее наличнымъ условіямъ ея естественнато быта.

§ 4. Движеніе наносовъ.

Каждый рѣчной и вообще естественный водяной потокъ всегда содержитъ въ себѣ и несетъ нѣкоторое болѣе или менѣе значительное количество землистыхъ частицъ, а иногда даже гравія и глыба. Примѣси этихъ веществъ въ водѣ потоковъ, съ одной стороны, являются слѣдствіемъ разрушительной работы самого потока, пролагающаго себѣ дорогу, съ другой—служатъ ему матеріаломъ для мѣстныхъ наращеній русла; поэтому предъ разсмотрѣніемъ хода разработки и образованія русла рѣчныхъ потоковъ представляется необходимымъ уяснить себѣ нѣкоторые законы движенія въ нихъ землистыхъ частицъ.

Вода, перемѣщаясь по своему руслу, оказываетъ на выступающія

по поверхности его частицы нѣкоторое давленіе, выражаемое такъ:

$$P = \gamma \cdot \delta \cdot \omega \frac{V^2}{2g}$$

гдѣ V —скорость давящей воды,

g —ускореніе силы тяжести,

ω —площадь поперечнаго сѣченія тѣла по плоскости, перпендикулярной къ направленію давленія,

δ —вѣсъ единицы объема воды,

γ —коэффициентъ.

По Дюбуа и Дюшмену, если длина тѣла по направленію давленія L и $\frac{L}{\sqrt{v}} = 1$, т. е. если тѣло имѣетъ приблизительно кубическую форму, то γ равно 1,45 и до 1,47.

Подъ такого рода давленіемъ, выступающія частицы отдѣляются отъ русла, причемъ тѣ изъ нихъ, которыя расположены на боковыхъ откосахъ русла, очевидно, должны отдѣляться легче, такъ какъ частицы эти сравнительно съ частицами, расположенными на днѣ русла, оказываются слабѣ связанными силою тяжести съ русломъ, находятся въ менѣе устойчивомъ положеніи и подвержены дѣйствію большихъ скоростей воды; отсюда ясно, почему земляныя русла рѣчныхъ потоковъ всегда развиваются больше въ ширину, чѣмъ въ глубину.

Отдѣленные отъ русла частицы увлекаются водою, и движеніе это происходитъ двоякимъ образомъ: или онѣ катятся по дну, или поднимаются (всплываютъ) въ верхніе слои воды и въ нихъ уже перемѣщаются (на плаву). Въ потокахъ незначительной глубины, съ прозрачною водою, можно нерѣдко видѣть, какъ песокъ и гравій, составляющіе русло, движутся по направленію движенія воды; но нѣтъ достаточныхъ наблюденій, которыя бы опредѣляли, съ какою скоростью происходитъ это движеніе, и какое соотношеніе существуетъ между силою потока и толщиною слоя матеріаловъ, перемѣщающихся по дну его. Можно однако же съ увѣренностью сказать, что подобное перемѣщеніе матеріаловъ русла вообще незначительно, что скорость его зависитъ отъ скорости теченія воды по дну русла *), и что значительныя массы наносовъ, складываемыя мѣс-

*) По наблюденіямъ Дюбуа, при скорости теченія отъ 1 до 2 ф. въ секунду, тонкій песокъ подвигается по дну со скоростью отъ 2-хъ до 13 верстъ въ годъ.

тами рѣкою, иногда на весьма большую высоту, приходятъ къ мѣстамъ отложенія другими способами, а именно на плаву изъ слоевъ воды.

Что всякая текущая вода можетъ нести въ струяхъ своихъ нѣкоторую массу такихъ твердыхъ частицъ, удѣльный вѣсъ коихъ не только равенъ или менѣе, но даже болѣе удѣльнаго вѣса воды, это всѣмъ извѣстно и наглядно подтверждается простыми наблюденіями надъ текущими водами: тѣмъ не менѣе явленіе это требуетъ нѣкоторыхъ объясненій. Представимъ себѣ движущійся равномерно потокъ, небольшой, сравнительно съ шириною, глубины (черт. 10), имѣющій наибольшую скорость на поверхности U , наименьшую скорость на днѣ V_h и поверхностный уклонъ i . Измѣненіе скоростей въ вертикальной плоскости по динамической оси потока будетъ выражаться показанною на чертежѣ параболою AB , и скорость на какой-либо глубинѣ x отъ поверхности, по Базену, будетъ:

$$V_x = U - K \sqrt{hi} \cdot \frac{x^2}{h^2},$$

$$\text{или } V_x = U - \alpha x^2, \quad \text{если } \frac{K \sqrt{hi}}{h^2} = \alpha.$$

Пусть на нѣкоторой глубинѣ x отъ поверхности находится небольшое сферическое твердое тѣло радиуса r . Если мы мысленно проведемъ черезъ центръ тѣла плоскость, параллельную поверхностному уклону потока OO' , то верхняя и нижняя части тѣла относительно этой плоскости будутъ находиться подъ вліяніемъ разныхъ скоростей теченія, а именно: на верхнюю часть будутъ дѣйствовать сравнительно бѣльшія скорости, чѣмъ на нижнюю.

Давленіе теченія на элементъ площади нормального (къ теченію) поперечнаго сѣченія тѣла вообще будетъ:

$$p = \frac{\gamma \delta}{2g} V^2 dw = \beta V^2 dw, \quad \text{гдѣ } \beta = \frac{\gamma \delta}{2g};$$

а слѣдовательно давленіе на верхнюю часть тѣла будетъ

$$P = \beta \cdot \int_x^{(x-r)} V^2 \cdot dw = \beta \cdot \frac{\pi r^2}{2} \cdot V_0^2,$$

и соотвѣтственно на нижнюю:

$$P_1 = \beta \cdot \frac{\pi r^2}{2} \cdot V_1^2,$$

гдѣ V_0 и V_1 суть не что иное, какъ среднія скорости струй, дѣйствующихъ на верхнюю и на нижнюю часть тѣла. Предположимъ, что центры давленій на верхнюю и нижнюю часть тѣла или, что то же, точки приложенія скоростей V_0 и V_1 , удалены отъ центра тѣла на величины μ и μ_1 и, въ виду незначительныхъ размѣровъ тѣла, для сокращенія вычислений, допустимъ, что $\mu = \mu_1 = nr$; тогда будемъ имѣть: равнодѣйствующая давленій, увлекающая тѣло въ направленіи теченія

$$R = P + P_1 = \beta \cdot \frac{\pi r^2}{2} (V_0^2 + V_1^2),$$

и моментъ вращенія тѣла въ сторону большей скорости

$$M = P\mu - P_1\mu_1 = \frac{\beta \pi r^3 n}{2} (V_0^2 - V_1^2).$$

Но

$$V_x = U - \alpha x^2,$$

а слѣдовательно:

$$V_0 = U - \alpha (x - nr)^2$$

$$V_1 = U - \alpha (x + nr)^2;$$

или:

$$V_0 + V_1 = 2U - 2\alpha (x^2 + n^2 r^2)$$

$$V_0 - V_1 = 4\alpha nr x;$$

откуда:

$$V_0^2 - V_1^2 = 8\alpha nr [U - \alpha x^2 - \alpha n^2 r^2] = 8\alpha nr x [V_x - \alpha n^2 r^2],$$

такъ что:

$$M = 4\pi \beta r^4 n^2 \alpha [V_x - \alpha n^2 r^2] x,$$

а вставляя вмѣсто α и β ихъ величины:

$$M = \frac{4K \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \pi \sqrt{hi} \cdot r^4 \cdot n^2}{2gh^2} \left[V_x - \frac{K \sqrt{hi} \cdot n^2 r^2}{h^2} \right] x.$$

Подъ вліяніемъ этого момента, дѣйствующаго въ сторону бѣльшей скорости, тѣло будетъ катиться вверхъ по нѣкоторой кривой, имѣющей въ началѣ движенія вертикальную касательную nn' . Мо-

ментъ этого катанія можетъ быть выраженъ еще чрезъ tr , гдѣ t есть нѣкоторая вертикальная сила, приложенная въ центрѣ тѣла, и r радіусъ тѣла; а потому изъ уравненія

$$tr = M$$

получимъ:

$$t = \frac{4 K \gamma \delta \sqrt{hi} \pi r^3 n^2}{2gh^2} \left[V_x - \frac{K \sqrt{hi} n^2 r^2}{h^2} \right] x.$$

Раздѣля эту величину t на объемъ погруженнаго тѣла $\frac{4}{3} \pi r^3$, мы получимъ специфическую подъемную силу t_1 , т. е. отнесенную къ единицѣ объема:

$$t_1 = \frac{3 K \gamma \delta \sqrt{hi} n^2}{2gh^2} \left[V_x - \frac{K \sqrt{hi} n^2 r^2}{h^2} \right] x,$$

и видимъ, что подъемная сила на единицу объема тѣмъ больше, чѣмъ размѣры тѣла меньше: поэтому *мелкія тѣла поднимаются потоками легче, чѣмъ крупныя.*

Для дальнѣйшаго изслѣдованія подъемной силы t , предположимъ сперва $x = h$, т. е. рассмотримъ подъемную силу t_h на днѣ потока. Такъ какъ по предыдущему

$$V_x = U - \alpha x^2 = \varphi \sqrt{hi} + K_1 \sqrt{hi} - \frac{K \sqrt{hi}}{h^2} x^2,$$

откуда при $x = h$, $V_h = (\varphi + K_1 - K) \sqrt{hi}$, то подъемная сила на днѣ потока будетъ:

$$\begin{aligned} t_h &= \frac{4 K \gamma \delta \sqrt{hi} \pi r^3 n^2}{2gh^2} \left[(\varphi + K_1 - K) \sqrt{hi} - \frac{K \sqrt{hi} n^2 r^2}{h^2} \right] h = \\ &= \frac{4 K \gamma \delta \pi r^3 n^2 hi}{2gh} \left[\varphi + K_1 - K \left\{ 1 + \left(\frac{nr}{h} \right)^2 \right\} \right]. \end{aligned}$$

Слѣдовательно, при постоянномъ h , подъемная сила t увеличивается съ возрастаніемъ i . Посмотримъ, какъ измѣняется t съ измѣненіемъ h при постоянной скорости V_h . Такъ какъ $V_h = (\varphi + K_1 - K) \sqrt{hi}$, то hi будетъ оставаться постояннымъ при постоянномъ V_h , а такъ какъ двучленъ $\left\{ 1 - \left(\frac{nr}{h} \right)^2 \right\}$, при достаточно большой глубинѣ въ сравненіи съ размѣрами тѣла, будетъ близокъ къ единицѣ, то мы можемъ принять, что

$$t_h = \frac{4 K \gamma \delta \pi r^3 n^2 hi}{2gh} \left[\varphi + K_1 - K \right] = \frac{4 K \delta \gamma \pi r^3 n^2 V_h^2}{2gh (\varphi + K_1 - K)},$$

откуда видно, что, при постоянной скорости V_h , подъемная сила на днѣ потока возрастаетъ съ уменьшеніемъ глубины. Отсюда понятно, почему *юрные потоки небольшой глубины и большой скорости обладаютъ способностью подымать большія количества крупныхъ твердыхъ веществъ*, какъ то гравія, голыша и даже камней.

Чтобы выяснитъ далѣе, какъ измѣняется подъемная сила t въ данномъ потокѣ для данного тѣла, по мѣрѣ перемѣщенія тѣла снизу вверхъ, мы можемъ написать выраженіе ея слѣдующимъ образомъ:

$$t = a (V_x - b) x,$$

гдѣ a и b не зависятъ отъ x , и затѣмъ, полагая $(V_x - b) x = hy$, и строя величины y , соотвѣтствующія величинамъ x по уравненію $y = \frac{(V_x - b) x}{h}$, получимъ кривую BD (черт. 10), выражающую измѣненія величины y , пропорціонально которой измѣняется испытываемая сила t по уравненію:

$$t = ah y.$$

Кривая BD показываетъ, что сила t , по мѣрѣ поднятія тѣла вверхъ, уменьшается.

На каждое тѣло, находящееся въ потокѣ, кромѣ этой силы, дѣйствуютъ еще въ вертикальномъ направленіи слѣдующія силы: внизъ — сила тяжести, имѣющая для тѣла сферическаго величину $\frac{4}{3} \pi r^3 \delta \varphi$, гдѣ δ вѣсъ единицы объема воды, а φ — удѣльный вѣсъ тѣла; и вверхъ — гидростатическое давленіе, имѣющее для того же тѣла величину $\frac{4}{3} \pi r^3 \delta$.

Поэтому общее приблизительное выраженіе силы, дѣйствующей снизу вверхъ на сферическое тѣло радіуса x , будетъ слѣдующее:

$$T = t + \frac{4}{3} \pi r^3 \delta - \frac{4}{3} \pi r^3 \delta \varphi, \text{ или}$$

$$T = \frac{3}{4} \pi r^3 \delta \left[\frac{3K \sqrt{hi} n^2}{2gh^2} \left(V_x - \frac{K \sqrt{hi} n^2 r^2}{h^2} \right) x + 1 - \varphi \right].$$

Въ этомъ выраженіи по вышеобъясненному первый переменный членъ въ скобкахъ уменьшается: во-первыхъ для всякаго тѣла по

мѣръ уменьшенія x , т. е. по мѣръ подъема тѣла въ верхніе слои потока; во-вторыхъ, онъ уменьшается независимо отъ x , т. е. при всякомъ положеніи тѣла, съ увеличеніемъ размѣровъ тѣла; кромѣ того величина T по данному выраженію, очевидно, уменьшается со всякимъ случайнымъ уменьшеніемъ скорости V_x , и съ увеличеніемъ удѣльнаго вѣса тѣла φ , при всѣхъ прочихъ одинаковыхъ обстоятельствахъ. Поэтому можно сказать, что каждое попадающее въ потокъ тѣло можетъ быть вообще поднято потокомъ отъ дна лишь до нѣкоторой опредѣленной высоты, соотвѣтствующей размѣрамъ и удѣльному вѣсу тѣла; что потокъ имѣетъ способность подымать на большую высоту отъ дна изъ тѣлъ равнаго объема тѣла меньшаго удѣльнаго вѣса и изъ тѣлъ одинаковаго удѣльнаго вѣса — тѣла меньшаго объема; и наконецъ, что потокъ можетъ удерживать въ взвѣшенномъ состояніи, на извѣстномъ отъ дна уровнѣ, поднятое имъ тѣло лишь до тѣхъ поръ, пока скорость V_x слоя, несущаго тѣло, не измѣняетъ своей величины; при всякомъ случайномъ уменьшеніи этой скорости тѣло станетъ опускаться внизъ.

Такъ какъ въ горизонтальныхъ плоскостяхъ скорости струй потока постепенно увеличиваются отъ береговъ къ плоскости динамической оси потока, по параболическому закону, аналогично съ увеличеніемъ скоростей отъ дна къ поверхности потока, то взвѣшенное въ какомъ-либо слое потока тѣло, въ силу разности скорости струй этого слоя, по тѣмъ же причинамъ, которыя нами выяснены для вертикальнаго его движенія, будетъ перемѣщаться отъ берега потока къ плоскости динамической оси его, и въ этомъ перемѣщеніи остановится въ такомъ разстояніи отъ плоскости динамической оси потока, которое соотвѣтствуетъ его размѣрамъ, а именно подойдетъ къ плоскости динамической оси потока тѣмъ ближе, чѣмъ размѣры его меньше.

Изъ всего сказаннаго также слѣдуетъ, что если нѣсколько тѣлъ несомыхъ потокомъ, двигаясь снизу вверхъ или отъ береговъ потока къ плоскости динамической оси его, или, наконецъ, въ направленіи теченія потока, сблизятся между собой до нѣкотораго спѣвленія, т. е. настолько, что будутъ представлять какъ бы одно тѣло; то эта группа тѣлъ, послѣ соединенія своего, начнетъ опускаться внизъ до того слоя, въ коемъ по объему своему будетъ въ состояніи удерживаться; поэтому каждый слой потока можетъ нести лишь извѣстное

свойственное ему количество тѣлъ и выдѣляетъ или осаждаетъ всѣ тѣ тѣла, которыя поступаютъ въ него сверху предѣла его насыщенія.

Хотя формулы, послужившія намъ основаніемъ для сказанныхъ выводовъ, далеко не заключаютъ въ себѣ всѣхъ тѣхъ условий, въ которыхъ дѣйствительно находится движеніе твердыхъ тѣлъ въ потокахъ воды, и хотя движеніе это значительно еще осложняется и видоизмѣняется не параллельноструйностью потоковъ и вихревыми въ нихъ движеніями; тѣмъ не менѣе всѣ выведенные нами основные законы движенія твердыхъ тѣлъ въ потокахъ или, какъ говорятъ, законы *движенія наносовъ*, вполне подтверждаются наблюденіями надъ рѣчными потоками. Дѣйствительно оказывается, что рѣчные потоки поднимаютъ попадающія въ нихъ, какъ отъ размыва русла, такъ и извнѣ, твердыя тѣла въ такомъ порядкѣ, что болѣе крупныя изъ нихъ располагаются въ струяхъ болѣе низкихъ и болѣе близкихъ къ берегамъ; другими словами,—что матеріалы наносовъ въ рѣчныхъ потокахъ разсортировываются силою самого потока по слоямъ и струямъ его снизу вверхъ и отъ береговъ къ плоскости динамической оси потока въ порядкѣ постепенно убывающей ихъ крупности; причемъ матеріалы большаго удѣльнаго вѣса всегда поднимаются на меньшую высоту отъ дна, и степень насыщенія слоевъ потока твердыми веществами постепенно убываетъ снизу вверхъ и отъ береговъ къ плоскости динамической оси потока. Кромѣ сего наблюдается, что при каждомъ уменьшеніи скорости теченія, какъ въ отдѣльных струяхъ и слояхъ, такъ и въ общей массѣ потока, происходитъ осажденіе несомыхъ имъ твердыхъ веществъ, т. е. наносовъ.

Изложенные нами законы объясняютъ всѣ явленія передвиженія и отложенія наносовъ рѣчными потоками.

Такъ, дѣлается совершенно яснымъ, почему крупность матеріаловъ въ наносныхъ отложеніяхъ рѣчныхъ потоковъ вообще постепенно уменьшается отъ верховьевъ потоковъ къ низовьямъ, т. е. почему наносныя отложенія состоятъ въ верховыхъ частяхъ рѣчныхъ потоковъ изъ болѣе крупныхъ матеріаловъ, чѣмъ въ низовыхъ. Причина этого явленія, очевидно, заключается вообще въ послѣдовательномъ уменьшеніи среднихъ скоростей потоковъ отъ верховьевъ къ низовьямъ, соотвѣтственно уменьшенію ихъ поверхностныхъ уклоновъ.

То, что наносныя отложенія въ рѣкахъ вообще состоятъ изъ наслоеній матеріаловъ, крупность коихъ постепенно убываетъ отъ

нижнихъ слоевъ къ верхнимъ, прямо объясняется тѣмъ послѣдовательнымъ порядкомъ, въ коемъ матеріалы эти несутся въ рѣчномъ потокѣ и осаждаются изъ него.

Наносныя отложенія, обыкновенно образующіяся въ уширенныхъ частяхъ русла рѣчныхъ потоковъ, а также въ устьяхъ ихъ при впаденіи въ другіе потоки, въ озера и моря, очевидно, являются слѣдствіемъ уменьшенія среднихъ и частныхъ скоростей теченія, несущаго наносы; причемъ это уменьшеніе скоростей происходитъ: въ уширеніяхъ русла—отъ увеличенія площади живаго сѣченія потока, отъ уменьшенія сжатія его и отъ ударовъ струй въ вихревыхъ движеніяхъ; въ устьяхъ же рѣкъ—отъ ударныхъ потерь, при встрѣчѣ двухъ двигающихся массъ воды или движущейся массы воды съ водою стоячею.

Мы уже сказали, что твердыя вещества, несомыя потокомъ, вообще являются съ одной стороны продуктомъ размыва его русла, съ другой—матеріаломъ для наращенія его русла; но изъ этого не слѣдуетъ, что всѣ твердыя вещества получаютъ рѣчными потоками исключительно отъ размыва ихъ собственныхъ руселъ. Напротивъ, въ большинствѣ случаевъ главная масса твердыхъ веществъ приносится въ рѣчные потоки извнѣ: ихъ притоками и наземными атмосферными водами, стекающими со скатовъ ихъ бассейновъ. Поэтому количество матеріаловъ для наносныхъ отложеній въ рѣчныхъ потокахъ зависитъ не только отъ степени размываемости ихъ руселъ, но еще въ большой степени отъ площадей, геологическихъ и топографическихъ условій ихъ бассейновъ, и въ каждомъ потокѣ измѣняется въ зависимости какъ отъ измѣненій силы, размывающей его русло, такъ и отъ количества притекающихъ въ него наземныхъ атмосферныхъ водъ.

§ 5. Образованіе русла рѣчныхъ потоковъ.

Въ разработкѣ и устройствѣ своего русла рѣка достигаетъ наибольшихъ результатовъ во время половодья, потому что въ это время она обладаетъ наибольшею размывающею силою и извнѣ получаетъ наибольшее количество наносовъ. Созданное ею въ это время русло подъ вліяніемъ меженныхъ водъ подвергается сравнительно незначительнымъ измѣненіямъ, которыя при вновь слѣдующихъ на-

водкахъ и половодьяхъ сглаживаются, исчезаютъ или совершенно преобразуются.

Въ общихъ чертахъ разработка русла рѣки имѣетъ слѣдующій ходъ.

Представляя собою вообще потокъ слабо-сжатый, способный раздѣляться на отдѣльныя группы струй, катящихся по вихревымъ линіямъ и отражающихся въ разныя стороны, рѣка прежде всего не можетъ сохранить прямолинейнаго направленія и въ планѣ разрабатываетъ себѣ русло въ видѣ цѣпи соприкасающихся обратныхъ кривыхъ; причѣмъ иногда происходитъ и раздѣленіе русла ея на криволинейные рукава (черт. 11).

Такой характеръ образованія рѣчныхъ руселъ можно видѣть на планахъ всѣхъ рѣкъ.

Въ образующихся криволинейныхъ частяхъ русла вихревыя линіи струй рѣчнаго потока подъ вліяніемъ центробѣжной силы сжимаются къ вогнутымъ берегамъ; въ томъ же направленіи перемѣщается динамическая ось потока, и у вогнутыхъ береговъ устанавливается замѣтно параллельно-струйное движеніе, скорости теченія растутъ, и подмывъ русла увеличивается до тѣхъ поръ, пока размывающая сила воды не уравнивается съ сопротивленіемъ грунта русла; въ то же время у выпуклыхъ береговъ происходитъ соответственное уменьшеніе скоростей теченія, и берега эти нарастаютъ наносами, такъ что поперечное сѣченіе русла получаетъ наибольшія глубины у вогнутаго берега и видъ показанный на черт. 12. Разрабатывая себѣ такимъ образомъ русло въ планѣ, рѣка какъ бы стремится придти въ состояніе сжатого параллельно-струйнаго потока и достигаетъ этого въ нѣкоторой степени въ криволинейныхъ частяхъ у вогнутыхъ береговъ; слабо сжатое же ея состояніе сохраняется въ уширеніяхъ русла, у раздѣленій его на рукава, въ переходахъ его изъ одной кривизны въ другую обратную и въ частяхъ его, сохраняющихъ слабую кривизну или прямолинейность въ силу особыхъ мѣстныхъ обстоятельствъ; причѣмъ недостатокъ сжатія рѣчнаго потока въ этихъ мѣстахъ усиливается въ межень. Стремленіе рѣчнаго потока создавать себѣ криволинейное русло чрезвычайно наглядно подтверждается расположеніемъ наносныхъ отложеній въ тѣхъ его частяхъ, которыя въ силу мѣстныхъ обстоятельствъ сохраняютъ прямолинейное или слабо криволинейное направленіе въ планѣ. Эти отложенія вообще располагаются какъ показано на черт. 13.

Идя по уклонам долины, рѣка встрѣчаетъ на пути своемъ: во 1-хъ, грунты, представляющіе неодинаковое сопротивленіе размыву и мѣстами иногда такіе крѣпкіе грунты, которые можно назвать неразмываемыми; во 2-хъ, неравномѣрныя уширенія и суженія долины и въ продольной профили представляетъ собою, какъ выше сказано, потокъ съ поверхностнымъ уклономъ, постепенно, но неравномѣрно, уменьшающимся отъ верховьевъ къ низовьямъ по нѣкоторой слабоволнообразной кривой, близкой къ ломаной линіи, части которой послѣдовательно то больше, то меньше наклонены къ горизонту.

Въ грунтахъ неразмываемыхъ русло рѣчнаго потока углубляться не можетъ; въ грунтахъ же размываемыхъ, въ тѣхъ участкахъ рѣчнаго потока, гдѣ поверхностный его уклонъ во время высокихъ водъ больше уклона сосѣднихъ (выше и ниже лежащаго) участковъ, — происходитъ большее углубленіе русла; въ участкахъ же, гдѣ во время высокихъ водъ поверхностный уклонъ меньше уклона сосѣднихъ участковъ, русло углубляется меньше, иногда, — не поддаваясь размыву при существующихъ скоростяхъ теченія, — вовсе не размывается, и иногда не только не размывается, но даже наращается до извѣстнаго предѣла наносами. Поэтому русло каждой рѣки въ продольной профили состоитъ изъ пониженныхъ глубокихъ мѣстъ — *плесовъ*, раздѣленныхъ между собою повышенными, болѣе мелкими мѣстами, называемыми *порогами*, *перевалами* и *перекатами*.

Порогами называются такія *повышенія русла* рѣки съ значительнымъ паденіемъ въ сторону теченія, которыя при самыхъ большихъ скоростяхъ и поверхностныхъ уклонахъ потока не размываются; пороги, очевидно, могутъ быть лишь въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ рѣка встрѣчаетъ неразмываемые скалистые и каменистые грунты.

Перевалами мы называемъ *) такія *повышенія русла* въ размываемыхъ грунтахъ, которыя при существующихъ сравнительно небольшихъ скоростяхъ и поверхностныхъ уклонахъ потока не под-

*) Перевалами на Волгѣ и на нѣкоторыхъ другихъ нашихъ рѣкахъ судоходцы называютъ переходы стрежня (динамической оси потока и линіи наибольшихъ глубинъ) отъ одного берега къ противоположному, но мы этотъ терминъ употребляемъ для другого назначенія, за неимѣніемъ подходящаго другого слова.

даются размыву; перевалы, очевидно, могут встрѣчаться во всѣхъ тѣхъ мѣстахъ рѣки, гдѣ скорости теченія во время высокихъ водъ, соотвѣтствующія поверхностнымъ уклонамъ потока, или вообще недостаточны для размыва грунтовъ русла, или имѣютъ величину меньшую скоростей сосѣднихъ участковъ. Въ связи съ планомъ русла такія мѣста могутъ встрѣчаться въ уширеніяхъ и раздѣленіяхъ русла на рукава, въ переходахъ его изъ одной кривизны въ другую, въ прямыхъ и слабо-криволинейныхъ его частяхъ и наконецъ въ такихъ не слабо-криволинейныхъ частяхъ его, которыя и при достаточномъ сжатіи потока не обладаютъ потребными для размыва грунта скоростями.

Перекатами мы называемъ такія повышенія русла рѣки, которыя образуются отъ сложенія въ немъ наносовъ.

Перекаты представляютъ собою какъ бы *перемѣнные перевалы*, возвышающіеся съ уменьшеніемъ скоростей потока, понижающіеся съ увеличеніемъ ихъ и перемѣщающіеся внизъ по теченію рѣки, при измѣненіяхъ ея русла въ планѣ. Перекаты являются въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ, во время высокихъ водъ, скорости теченія, соотвѣтствующія поверхностнымъ уклонамъ потока, значительно меньше скоростей сосѣднихъ участковъ, и гдѣ, при спадѣ водъ и въ межень, потокъ отличается слабымъ сжатіемъ, а именно: въ уширеніяхъ и въ раздѣленіяхъ русла на рукава, въ переходахъ его изъ одной кривизны въ другую обратную, въ прямыхъ и слабо-криволинейныхъ частяхъ его.

Поверхностный уклонъ рѣчнаго потока въ одномъ и томъ же участкѣ при разныхъ расходахъ, какъ выше сказано, измѣняется: то увеличивается, то уменьшается. Въ плесахъ поверхностный уклонъ потока обыкновенно имѣетъ наибольшую величину во время высокихъ водъ, съ паденіемъ горизонта воды постепенно уменьшается и наименьшую величину получаетъ во время межени, при самомъ низкомъ горизонтѣ воды; на перевалахъ и перекатахъ поверхностный уклонъ потока обыкновенно имѣетъ наименьшую величину во время высокихъ водъ, съ пониженіемъ горизонта воды увеличивается и получаетъ наибольшую величину во время межени при самомъ низкомъ горизонтѣ воды; во время межени поверхностный уклонъ потока на перевалахъ и перекатахъ всегда больше поверхностнаго уклона потока въ прилежащихъ къ нимъ плесахъ (см. черт. 14).

Такъ какъ средняя скорость, живая сила потока и скорость на днѣ его, отъ которыхъ зависятъ способности потока размывать свое русло и проносить наносы, тѣмъ больше, чѣмъ больше поверхностный уклонъ потока и чѣмъ больше его глубина, то въ плесахъ и прочихъ частяхъ рѣки пониженіе горизонта воды оказываетъ совершенно различныя вліянія на углубленіе русла и пренесеніе наносовъ. Въ плесахъ, по мѣрѣ пониженія горизонта воды, уменьшаются глубина и поверхностный уклонъ потока, приче́мъ происходитъ постепенное уменьшеніе скорости на днѣ, средней скорости и живой силы воды, а вмѣстѣ съ тѣмъ, постепенно прекращается размывъ русла, происходившій во время высокихъ водъ, и начинается иногда нѣкоторое осажденіе наносовъ въ углубленномъ руслѣ, т. е. обратное наращеніе его. На перевалахъ и перекатахъ, съ пониженіемъ горизонта, уменьшается глубина, но увеличивается поверхностный уклонъ потока и вслѣдствіе преобладающаго вліянія увеличенія уклона скорость на днѣ, средняя скорость и живая сила потока возрастаютъ, а вмѣстѣ съ тѣмъ не только прекращается бывшее при высокихъ водахъ отложеніе наносовъ, но постепенно наступаетъ размывъ и снесеніе ихъ. На перевалахъ, наступающее по мѣрѣ спада высокихъ водъ, снесеніе наносовъ идетъ энергично, и перевалы освобождаются отъ нихъ въ большей или меньшей степени, что зависитъ отъ сжатія потока на нихъ во время межени. На перекатахъ же рѣчной потокъ вообще слабо сжать и по мѣрѣ пониженія горизонта воды въ большинствѣ случаевъ теряетъ свое сжатіе, т. е. все въ большей и большей степени пріобрѣтаетъ способность раздѣляться на отдѣльныя группы струй, катящихся не параллельно и сталкивающихся другъ съ другомъ. Поэтому процессъ размыва и снесенія наносовъ, наступающій съ пониженіемъ горизонта воды до нѣкотораго предѣла, на перекатахъ идетъ въ большинствѣ случаевъ постепенно ослабѣвая, медленно и неравномѣрно: въ мѣстахъ соединеннаго дѣйствія струй — наносы размываются и несутся, въ мѣстахъ же столкновенія ихъ—вновь складываются на перека́тъ и перека́тъ во время межени, обыкновенно, представляется покрытымъ массою разнообразныхъ подводныхъ и надводныхъ отмелей, раздѣленныхъ извилистыми, колеблющимися и перемѣщающимися протоками разной глубины. Отмели эти то подмываются, то нарастаютъ съ разныхъ сторонъ, но все-таки имѣютъ нѣкоторое опредѣленное поступательное движеніе къ нижележащему плесу.

Если изобразить очертанія рѣчнаго русла въ планѣ горизонталями, то получимъ видъ подобный чертежу 15. Линія *ab*, соединяющая точки перелома горизонталей, есть линія наибольшихъ глубинъ: она въ большинствѣ случаевъ совпадаетъ съ проекціей динамической оси потока и называется *стрезнемъ* рѣки; это есть ось фавратора или судового хода по рѣкѣ. Линія наибольшихъ глубинъ въ планѣ приближается болѣе къ вогнутымъ берегамъ и въ переходахъ изъ одной кривизны русла въ другую, обратную, дѣлаетъ иногда крутые повороты (*mn*), въ коихъ судоходство встрѣчаетъ немаловажныя препятствія.

Итакъ мы видимъ, что каждая рѣка вырабатываетъ себѣ русло въ планѣ и въ продольной профили съ такимъ относительнымъ расположеніемъ поворотовъ, рукавовъ, пониженій (плесовъ) и повышеній (переваловъ и перекатовъ), которое соотвѣтствуетъ всѣмъ даннымъ условіямъ ея естественнаго быта; но эти естественныя условія во всѣхъ своихъ частяхъ, какъ намъ извѣстно, не остаются неизмѣнными, а именно: количества воды, питающія рѣку въ разное время года, измѣняются; количества наносовъ, получаемыхъ ею отъ разработки своего русла и извнѣ, также измѣняется; кромѣ того берега ея подвергаются постоянно медленнымъ, постепеннымъ или же внезапнымъ подмывамъ и обрушеніямъ; въ устьяхъ временныхъ и постоянныхъ притоковъ ея образуются и нарастаютъ отмели (бары), дѣйствующія какъ струеотводныя сооруженія, возводимыя самою природою; наконецъ въ руслѣ ея происходятъ случайныя засоренія отъ падающихъ камней, деревьевъ и устраиваются сооруженія съ разными цѣлями, или производящія стѣсненіемъ живаго сѣченія чувствительное увеличеніе скоростей потока, или отклоняющія динамическую ось его отъ естественнаго положенія. Вслѣдствіе всѣхъ этихъ причинъ въ руслахъ рѣкъ, въ особенности въ слабыхъ, легко размываемыхъ грунтахъ, происходятъ временныя или постоянныя, болѣе или менѣе значительныя, медленныя или внезапныя измѣненія въ планѣ и въ продольной профили. Постоянство, большая или меньшая значительность, медленность или внезапность этихъ измѣненій зависятъ отъ характера и силы причинъ ихъ вызывающихъ. Во всякомъ случаѣ происходящія въ руслахъ рѣкъ измѣненія совершаются въ извѣстныхъ предѣлахъ, и предѣлы эти устанавливаются самою природою:

во 1-хъ, въ тѣхъ опорныхъ точкахъ плана и продольной профили русла, которыя рѣчной потокъ, при наибольшей возможной его силѣ, не можетъ размьть и устранить,

и во 2-хъ, въ томъ, что производимыя рѣкою измѣненія въ собственномъ ея руслѣ имѣють обратныя вліянія на силу ея потока; такъ напр. по мѣрѣ размыва русла, съ *увеличеніемъ площади живаго сѣченія* потока или съ *уменьшеніемъ поверхностнаго уклона* его (подъ вліяніемъ удлиненія въ кривыхъ частяхъ), скорости теченія убываютъ, и вслѣдствіе сего наступаетъ такое состояніе потока, въ которомъ работа его по размыву русла *ослабѣваетъ* и наконецъ *прекращается*; точно также, по мѣрѣ засоренія русла наносами, съ *уменьшеніемъ площади живаго его сѣченія*, скорости теченія возрастаютъ и отложеніе наносовъ *постепенно прекращается*.

§ 6. Ледъ и его движенія.

Среди явленій, имѣющихъ большое значеніе на внутреннихъ водяныхъ путяхъ, одно изъ важныхъ мѣстъ занимаетъ образованіе и движеніе льда (ледоходъ) на ихъ поверхности.

Ежегодно, отъ начала замерзанія до окончательнаго удаленія льда (растаяніемъ или уходомъ), внутренніе водяные пути вообще недоступны для судоходства. Періодъ этотъ въ разныхъ климатическихъ полосахъ имѣетъ разную продолжительность и въ Россіи слѣдующую: въ сѣверной полосѣ около 6 мѣсяцевъ; въ средней—около 4—5 мѣсяцевъ и въ южной около 3—4 мѣсяцевъ; причемъ остальное время года, въ которое водяные пути открыты для пользованія, называется *судоходнымъ или навигаціоннымъ* *).

Образованіе и движеніе льда на поверхности внутреннихъ водяныхъ путей не только сокращаетъ время полезной ихъ дѣятельности, но еще оказываетъ вліяніе на русла ихъ и сооруженія въ нихъ возводимыя.

Такъ, образовавшійся и покоющійся на поверхности воды ледъ съ повышеніемъ горизонта воды подымается, а съ пониженіемъ его

*) Судоходный періодъ иногда сокращается: на нѣкоторыхъ рѣкахъ чрезъ мѣрно высокими паводками, представляющими опасности для судоходства; а на нѣкоторыхъ озерахъ—буями.

опускается и производит на сооруженія, къ коимъ онъ примѣръ, давленіе то вверхъ, то внизъ.

Вслѣдствіе этихъ давленій, обмерзающія въ водѣ сооруженія могутъ не только подвергаться поврежденіямъ въ боковыхъ поверхностяхъ своихъ, сцѣпленныхъ со льдомъ, но и быть подняты съ основаній своихъ или выдернуты изъ грунта. Ледъ же, поднятый, оторванный отъ береговъ водою и за симъ, подъ вліяніемъ теченія и вѣтровъ, пришедшій въ движеніе, можетъ производить *трениемъ* и *ударами* значительныя поврежденія въ сооруженіяхъ и берегахъ. Кромѣ сего въ рѣкахъ ледоходъ иногда сопровождается весьма опасными явленіями, называемыми ледяными *зажорами* или *заторами*. Явленіе это заключается въ слѣдующемъ. Движущіяся массы льда, встрѣчая нѣкоторыя препятствія своему движенію, въ какомъ-либо мѣстѣ рѣки спираются и останавливаются; настигающія ихъ новыя массы или наскакиваютъ, нагромождаются сверху и топятъ ихъ внизъ, покрываясь въ свою очередь новыми массами льда или же подбиваются теченіемъ внизъ подъ остановившіяся массы; такимъ образомъ въ рѣкѣ постепенно образуется ледяная плотина (*зажоръ* или *заторъ*), препятствующая теченію воды. Горизонтъ воды съ верховой стороны плотины подымается, а вмѣстѣ съ тѣмъ растетъ и плотина до тѣхъ поръ, пока вода напоромъ своимъ не прорветъ ее, или не вымоетъ себѣ новаго русла въ обходъ ея. До прорыва *зажора* происходитъ наводненіе мѣстностей по верховой сторонѣ его; послѣ прорыва *зажора* подвергаются опасности мѣстности и части русла рѣки, лежащія въ низовой сторонѣ, потому что прорвавшійся потокъ рветъ и сноситъ со страшною силою все, встрѣчающееся ему на пути.

Причины остановокъ и спиранія льда, а слѣдовательно и образованія *зажоровъ* въ рѣкахъ, можно раздѣлить на двѣ категоріи:

1) *причинъ внѣшнихъ*, случайныхъ, не связанныхъ со свойствами самого потока и естественнаго его русла. Этого рода причины заключаются въ случайныхъ засореніяхъ русла и иногда въ сооруженіяхъ, возводимыхъ въ руслѣ съ разными цѣлями, но безъ надлежащаго соображенія относительно свободнаго пропуска льда, и

2) *причинъ естественныхъ*, т. е. зависящихъ отъ естественныхъ условій *ледохода*, потока и его русла. Причины этого рода складываются изъ слѣдующихъ обстоятельствъ.

Толщина образующагося въ рѣкѣ льда зависитъ не только отъ бывающаго въ зимнее время пониженія температуры, но еще отъ скорости и глубины теченія. Чѣмъ скорость теченія больше, а также чѣмъ глубина больше, тѣмъ при всѣхъ прочихъ одинаковыхъ обстоятельствахъ, толщина образующагося льда меньше, и наоборотъ. Поэтому въ мѣстахъ слабыхъ скоростей и малыхъ глубинъ у насъ нерѣдко происходитъ промерзаніе воды до дна рѣчнаго русла, причемъ потокъ прорабатываетъ себѣ подъ льдомъ болѣе глубокій ходъ въ одной какой-либо части своей ширины. Такого рода ледяныя загражденія русла, не оттаявшія или непокрытыя толстымъ слоемъ воды предъ наступленіемъ ледохода въ вышележащихъ частяхъ рѣки, очевидно, могутъ быть удобнымъ мѣстомъ для образованія зажора, и нерѣдко бываютъ причинами зажоровъ въ рѣкахъ, текущихъ съ юга къ сѣверу.

Кромѣ сего, такъ какъ ни пониженія температуры, ни скорости теченія, ни глубины, ни ширины по урѣзу воды на всемъ протяженіи рѣки вообще не имѣютъ однообразныхъ величинъ, то количество образующагося льда въ разныхъ участкахъ рѣки обыкновенно имѣетъ разнообразныя величины по площади и толщинѣ.

За симъ, такъ какъ подъемъ рѣчнаго льда, его разломъ и движеніе начинаются во время наводковъ послѣ сильныхъ оттепелей обыкновенно въ началѣ весенняго половодья, наступающаго по всему протяженію рѣки не одновременно и съ разною силою, и такъ какъ въ разныхъ участкахъ рѣки количество льда увеличивается еще въ различной степени льдомъ изъ притоковъ; то ледъ по теченію рѣки вообще двигается крайне неравномѣрными массами, идетъ въ разныхъ участкахъ рѣки при разныхъ горизонтахъ съ разными скоростями и встрѣчаетъ для своего прохода то болѣе, то менѣе достаточныя ширины и глубины русла, а потому во время своего движенія то сплотняется, то разсѣвается.

Сплотненіе движущагося льда происходитъ при уменьшеніи скоростей теченія, а также въ крутыхъ колѣнахъ русла; и если, за симъ, сплотившаяся масса льда встрѣчаетъ ширину русла или глубину русла, недостаточныя для ея свободнаго прохода, то останавливается и производитъ зажоръ.

Изъ всего сказаннаго о льдѣ и ледоходѣ на внутреннихъ водныхъ путяхъ мы видимъ, что при изученіи водяныхъ путей и въ

особенности рѣкъ въ Россіи, съ цѣлью улучшенія ихъ, необходимо собирать свѣдѣнія:

- 1) о времени и горизонтѣ ихъ замерзанія (ледостава).
- 2) о времени и горизонтѣ ледохода на нихъ.
- и 3) о силѣ и характерѣ ледохода въ особенности по отношенію къ возможности образованія *зажоровъ*.

ГЛАВА II.

Способы передвиженія грузовъ по внутреннимъ водянымъ путямъ и условія путей, имъ соотвѣтствующія.

§ 1. О способахъ передвиженія грузовъ водою вообще.

Самымъ первобытнымъ способомъ перемѣщенія грузовъ по водѣ представляется *сплавъ*, т. е. передвиженіе ихъ силою теченія.

Способъ этотъ, указанный человеку самою природою, очевидно, можетъ имѣть примѣненіе лишь на такихъ водяныхъ путяхъ, которые обладаютъ постоянными теченіями въ опредѣленномъ направленіи, т. е. на рѣкахъ, и изъ всѣхъ способовъ передвиженія грузовъ представляется наивыгоднѣйшимъ, ибо движущая сила въ немъ даровая и обладаетъ притомъ необходимымъ постоянствомъ величины и направленія.

Въ тѣхъ случаяхъ, когда направленіе желаемого перемѣщенія грузовъ противоположно направленію теченія или когда водяной путь не имѣетъ теченія, представляется необходимымъ прибѣгать къ другимъ способамъ перемѣщенія грузовъ, а именно:

посредствомъ давленія вѣтра, посредствомъ отталкиванія въ желаемомъ направленіи, посредствомъ *тяги* и наконецъ на самодвижущихся паровыхъ судахъ.

Перемѣщеніе грузовъ посредствомъ *давленія вѣтра* заключается въ томъ, что къ судну, вмѣщающему грузъ, извѣстнымъ образомъ прикрѣпляются пріемники давленія вѣтра, — *паруса*, и подъ давленіемъ вѣтра судно перемѣщается въ сторону дѣйствія вѣтра въ направленіи съ нимъ совпадающемъ или близкомъ къ его направленію.

Само собою разумѣется, что способъ этотъ, по существу весьма выгодный, можетъ быть примѣнимъ вообще лишь на достаточно широкихъ и свободныхъ водныхъ пространствахъ, т. е. преимущественно на озерахъ и въ тѣхъ лишь случаяхъ, когда имѣется вѣтеръ попутный движенію грузовъ, и притомъ достаточной силы.

Перемѣщеніе грузовъ посредствомъ *отталкиванія* заключается въ томъ, что рабочіе, находящіеся на суднѣ, вмѣщающемъ грузъ, отталкиваютъ его въ опредѣленномъ направленіи или дѣйствуя ударами *веселъ*, или упираясь *шестами* въ дно водяного пути. Эти оба приема отталкиванія требуютъ затраты весьма большой рабочей силы, сравнительно съ величиною перемѣщаемого груза, и могутъ быть съ удобствомъ примѣняемы: первый — для перемѣщенія лишь легкихъ, малыхъ судовъ; второй — для медленнаго перемѣщенія судовъ, не особенно большого размѣра, на малыя разстоянія и притомъ на водяныхъ путяхъ малой глубины.

Перемѣщеніе грузовъ *тягою* заключается въ томъ, что суда, вмѣщающіе грузы, тянутся въ опредѣленномъ направленіи или силою идущихъ по берегу водяного пути людей и животныхъ, или силою установленныхъ на нихъ или впереди ихъ машинъ, или же силою идущихъ впереди ихъ судовъ, приводимыхъ въ движеніе машинами.

Способъ перемѣщенія грузовъ *тягою* имѣетъ наибольшее распространеніе на внутреннихъ водныхъ путяхъ и часто примѣняется даже къ перемѣщенію грузовъ внизъ по теченію въ видахъ ускоренія ихъ движенія.

Перемѣщеніе грузовъ на судахъ, самостоятельно двигающихся подъ дѣйствіемъ силы пара, можетъ быть разсматриваемо какъ особый, измѣненный видъ *паровой тяги* грузовъ, имѣющій въ нѣкоторыхъ случаяхъ спеціальныя преимущества.

И такъ мы видимъ, что изъ поименованныхъ способовъ перемѣщенія грузовъ наибольшее экономическое значеніе на внутреннихъ водныхъ путяхъ могутъ имѣть *сплавъ* и *тяга*, и потому мы войдемъ въ нѣкоторыя подробности оспосительно этихъ способовъ, дабы выяснитъ тѣ существенныя ихъ требованія, которымъ должны удовлетворять внутренніе водяные пути.

§ 2. Сплавъ.

Самый элементарный видъ сплава есть, такъ называемый, *сплавъ розсыпью*, т. е. сплавъ грузовъ отдѣльными штуками безъ всякой связи. Такимъ образомъ могутъ быть перемѣщаемы внизъ по теченію, очевидно, лишь грузы, *плавающие* въ водѣ, т. е. имѣющіе удѣльный вѣсъ меньше единицы, и притомъ мало или вовсе нестрадающіе отъ подмочки и ударовъ, такъ-то: нѣкоторые строительные лѣсные матеріалы и дрова.

Этотъ видъ сплава, въ особенности для мелкихъ матеріаловъ, какъ напр. дрова, примѣнимъ на потокахъ самыхъ незначительныхъ размѣровъ въ ширину и глубину и, при самыхъ разнообразныхъ скоростяхъ теченія, требуетъ довольно простыхъ приспособленій для отпуска, направленія въ пути и приѣма сплавляемыхъ грузовъ; но въ то же время представляетъ значительныя неудобства: во 1-хъ тѣмъ, что стѣсняетъ и иногда дѣлаетъ совершенно невозможнымъ всякое другое, одновременное съ нимъ, перемѣщеніе грузовъ по тому же пути; во 2-хъ тѣмъ, что сплавляемые такимъ образомъ лѣсные матеріалы и дрова иногда слишкомъ сильно пропитываются водою и теряютъ въ своихъ качествахъ.

Поэтому сплавъ розсыпью, вообще, практикуется на незначительныя протяженія и тогда только, когда другіе способы перемѣщенія грузовъ не примѣняются или за невозможностью, или за отсутствіемъ въ нихъ потребности.

Для сплава розсыпью требуются слѣдующія приспособленія:

1) Пруды или затоны для предварительнаго сбора или скопленія матеріаловъ, предназначаемыхъ для сплава.

Пруды эти или затоны устраиваются въ верховьяхъ, притокахъ или рукавахъ сплавнаго пути посредствомъ загражденія ихъ плотинами самой простой конструкции съ отверстіями для выпуска воды и скопленныхъ за ними матеріаловъ.

Устройство этихъ плотинъ не заслуживаетъ спеціальнаго изученія и сдѣлается совершенно понятнымъ при описаніи устройства водоподъемныхъ плотинъ, о которыхъ мы будемъ говорить впоследствии.

2) Приспособленія для направленія грузовъ въ пути.

Приспособленія эти обыкновенно заключаются въ такъ называемыхъ *запояхъ* или *бонахъ*, т. е. плавучихъ цѣпяхъ изъ бревенъ или деревянныхъ брусевъ, располагаемыхъ въ соотвѣтственныхъ мѣстахъ сплаваго пути такимъ образомъ, чтобы плывущіе матеріалы не уклонялись въ сторону отъ главнаго теченія и не останавливались или не попадали въ боковые рукава.

Каждое звено запони (черт. 16) состоитъ изъ 2-хъ или 4-хъ бревенъ или брусевъ (длиною отъ 3 до 4 саж.), связанныхъ между собою шпонками (черт. 16) и скобами или болтами (черт. 17); звенья запони соединяются между собою посредствомъ желѣзныхъ колецъ и канатовъ или желѣзныхъ цѣпей или наконецъ посредствомъ особыхъ желѣзныхъ проушинъ съ цѣпами (черт. 18). Концы запони привязываются къ сваямъ, забитымъ у береговъ или въ руслѣ; промежуточные же звенья ея опираются въ забитыя въ соотвѣтственномъ направленіи сваи (черт. 16).

и 3) *Ловильныя* приспособленія въ концѣ сплаваго участка, при помощи коихъ сплавленный матеріалъ останавливается и иногда направляется въ пріемные боковые бассейны.

Приспособленія этого рода заключаются въ такъ называемыхъ рѣшетчатыхъ ловильныхъ запрудахъ, устраиваемыхъ поперекъ сплаваго пути.

Ловильная запруда состоитъ (черт. 19) изъ ряда свай, забитыхъ въ русло сплаваго пути, связанныхъ вверху схватками. Къ этимъ схваткамъ и сваямъ прислоняются деревянные рѣшетки на столько частыя, чтобы сквозь нихъ не могъ проходить сплавляемый матеріалъ. Иногда рѣшетки замѣняются кольями, забиваемыми въ русло и опирающимися верхними концами въ схватки свай.

Иногда вмѣсто рѣшетчатыхъ запрудъ, по линіи свай, забитыхъ поперекъ сплаваго русла, устанавливаются запони.

Останавливаемые такими способами сплавные матеріалы или выбираются рабочими прямо на берегъ, или предварительно направляются ими въ боковые пріемные бассейны.

Первымъ усовершенствованіемъ въ сплавѣ представляется сплавъ лѣсныхъ матеріаловъ въ связанныхъ массахъ, а именно: сплавъ дровъ въ такъ называемыхъ *обрубкахъ* или *огородахъ* и сплавъ строеваго лѣса въ *плотахъ*.

Обрубы или *огороды* представляютъ собою ряжевые ящики дли-

ною до 5, шириною до 4 саж., изъ бревенъ толщиною около 5 вершковъ, высотой въ 5 вѣнцовъ, съ легкими днищами изъ жердей. Такіе обруббы вмѣщаютъ около 8 куб. саж. дровъ.

Плоты обыкновенно вяжутся изъ бревенъ слѣдующимъ образомъ. Плавающія бревна разной длины сгоняются въ рядъ и связываются между собою посредствомъ положенныхъ сверху жердей, какъ бы въ платформу, ширина коей равняется ширинѣ свободного хода пути, а длина простирается до 15 саж. (черт. 20) и болѣе. Связующія жерди кладутся поперекъ и иногда по діагоналямъ, и прикрѣпляются къ бревнамъ посредствомъ вицъ, т. е. скрученныхъ ивовыхъ, ореховыхъ, а иногда и еловыхъ прутьевъ; при этомъ бревна связываются вицами съ жердями или попарно, какъ показано на черт. 20 и 21—б, или каждое въ отдѣльности, какъ показано на чертежѣ 21—а.

На связанный такимъ образомъ однорядный плотъ иногда накладываются еще нѣсколько рядовъ бревенъ въ перевязку, т. е. поперекъ и вдоль, и плоты по числу рядовъ бревенъ бываютъ однорядные, двухъ, трехъ, черырёхрядные и болѣе.

Иногда бревенчатые плоты нагружаются еще сверху досками, мелкими лѣсными матеріалами и вообще небольшими слоями такихъ продуктовъ, которые не боятся сырости.

Иногда плоты связываются и изъ толстыхъ досокъ; въ такомъ случаѣ доски располагаются пакетами (въ 5—6 досокъ по высотѣ) вдоль плота, причемъ пакеты ихъ связываются между собою поперечными схватками изъ жердей, положенныхъ сверху и снизу и стянутыхъ вицами или веревками.

Для сплава, какъ обруббы съ дровами, такъ и плоты изъ строевого лѣса счаливаются вдоль канатами по нѣсколько штукъ вмѣстѣ въ такъ называемыя гонки.

Длина гонокъ достигается нерѣдко 50—60 сажень и вообще сообразуется съ шириною и крутизною поворотовъ имѣющаго *хода* въ рѣкѣ; чѣмъ повороты круче и чѣмъ ширина *хода* меньше, тѣмъ короче дѣлаютъ гонки; въ очень же крутыхъ поворотахъ гонки расчаливаются, и пропускъ обруббовъ и плотовъ производится по одиночкѣ.

Обруббы, плоты и составленные изъ нихъ гонки направляются въ пути и останавливаются, гдѣ потребуется, находящимися на нихъ рабочими.

Для остановки гонокъ употребляются: а) при слабыхъ скоростяхъ теченія, небольшихъ глубинахъ и небольшихъ размѣрахъ гонокъ такъ называемые сошила, т. е. толстые (около 4 вершковъ) кольца съ заостренными и иногда окованными желѣзомъ (черт. 22) концами; сошила опускаются на дно рѣки съ верховаго (задняго) конца гонки чрезъ прикрѣпленные къ этому концу петли изъ канатовъ, или чрезъ оставленный въ ней для сего промежутокъ между бревнами, и, врѣзываясь въ дно рѣки, останавливаютъ движеніе гонки; б) при болѣе значительныхъ скоростяхъ теченія, глубинахъ и размѣрахъ гонокъ—обыкновенные судовые якоря вѣсомъ до 3 пудовъ; якорь, прикрѣпленный посредствомъ длиннаго каната къ верховому концу гонки, будучи брошенъ на дно рѣки, своими лапами врѣзывается въ грунтъ или захватываетъ за выступы дна (въ случаѣ скалистаго грунта) и останавливаетъ движеніе гонки (черт. 23).

Для направленія гонокъ въ пути, т. е. для отклоненія движенія ихъ въ ту или другую сторону употребляются: а) шесты (черт. 24) или багры (черт. 25), коими рабочіе упираются въ дно рѣки и отталкиваютъ гонки въ желаемомъ направленіи; б) потеси, т. е. большія весла, укрѣпляемые по одному или по два на каждомъ концѣ гонки, ударами коихъ рабочіе отводятъ низовой или верховой конецъ въ желаемую сторону (черт. 26), и в) рысковые якоря. Рысковые якоря употребляются при крутыхъ поворотахъ и большихъ скоростяхъ теченія. Дѣйствіе рысковомъ якоремъ заключается въ слѣдующемъ. Предъ требуемымъ поворотомъ не тяжелый якорь заводится впередъ и бросается въ соотвѣтственномъ мѣстѣ на дно рѣки или на берегъ, идущій же отъ него канатъ удерживается, натягивается и постепенно укорачивается до извѣстнаго предѣла находящимися на плоту рабочими, причемъ плотъ, войдя въ поворотъ подъ вліяніемъ теченія, описываетъ около якоря какъ около центра нѣкоторую дугу, т. е. какъ говорятъ вырыскиваетъ.

Для сплава гонокъ требуются уже нѣкоторыя опредѣленные качества водянаго пути, а именно: 1) глубина воды по *ходу* — для однорядныхъ плотовъ безъ нагрузки—не менѣе 0,25 саж., для *обрубовъ* же не менѣе 0,30 саж., и 2) достаточная ширина и не очень крутые повороты ходовой полосы.

Послѣднимъ усовершенствованіемъ въ сплавѣ представляется сплавъ грузовъ въ судахъ.

Въ судахъ могутъ быть перемѣщаемы внизъ по теченію всякаго рода грузы. Суда, употребляемыя для сплава, могутъ имѣть совершенно такую же конструкцію, какъ и суда, употребляемыя для перемѣщенія грузовъ *тягою*, и лишь при особыхъ обстоятельствахъ нѣсколько отличаются отъ нихъ.

Особенности конструкціи и условій движенія судовъ сплавныхъ лучше всего могутъ быть выяснены при сравнительномъ описаніи ихъ съ судами, употребляемыми для тяги грузовъ; а потому мы рассмотримъ конструкцію и условія движенія судовъ вообще и за симъ выяснимъ тѣ особенности, которыя соотвѣтствуютъ двумъ видамъ ихъ перемѣщенія—*сплаву* и *тягѣ*.

§ 3. Суда и условія ихъ движенія.

Очертанія судовъ.

Суда вообще представляютъ собою вмѣстилища для грузовъ, состоящія изъ взаимно связанныхъ поперечныхъ и продольныхъ реберъ и прикрѣпленной къ нимъ *обшивки*.

Наружная форма и общее расположеніе частей каждаго судна опредѣляются очертаніями его въ состояніи покоя и нормальнаго равновѣсія, въ трехъ слѣдующихъ главныхъ плоскостяхъ проекцій:

а) Въ плоскости *діаметральной*; т. е. вертикальной плоскости, проходящей чрезъ среднюю продольную ось судна. Очертаніе судна въ этой плоскости называются *боковымъ чертежемъ*.

б) Въ плоскости *грузовой ватерлини*, т. е. въ горизонтальной плоскости, проходящей чрезъ ту линію наружной поверхности судна, до коей судно погружается въ стоячей водѣ, находясь подъ полнымъ грузомъ. Очертанія судна въ этой плоскости называются *планомъ*.

и в) Въ плоскости *мидельшпангоута*, т. е. въ вертикальной плоскости, проходящей чрезъ наибольшее поперечное сѣченіе судна. Очертанія судна въ этой плоскости называются очертаніями *корпуса*.

Отъ пересѣченія внутренней поверхности наружной обшивки судна плоскостями параллельными плоскостямъ проекцій получаютъ слѣдующія кривыя, опредѣляющія очертанія скелета судна (см. черт. 27):

1) *Ватерлини* — отъ пересѣченія плоскостями параллельными плоскости плана.

2. *Линіи шпангоутовъ*—отъ пересѣченія плоскостями параллельными плоскости мидельшпангоута;

и 3. *Батоксы*—отъ пересѣченія плоскостями параллельными діаметральной плоскости.

Кромѣ сего для повѣрки правильности сопряженій въ очертаніяхъ скелета судна служатъ кривыя называемыя *рыбинами*, получаемыя отъ пересѣченій внутренней поверхности наружной обшивки судна плоскостями перпендикулярными къ плоскости мидельшпангоута и наклонными къ діаметральной плоскости.

Чертежи, опредѣляющіе въ означенныхъ проекціяхъ очертанія скелета судна и общее расположеніе частей его, называются *теоретическими чертежами* въ отличіе отъ чертежей *практическихъ*, коими опредѣляются детали устройства судна.

Главные свойства судовъ правильного очертанія суть слѣдующія:

1. Діаметральная плоскость дѣлитъ судно на двѣ равныя совершенно симметричныя части.

2. Плоскость мидельшпангоута дѣлитъ судно на двѣ части приблизительно равныя по длинѣ и по *водоизмѣщенію*, т. е. проходитъ приблизительно чрезъ средину длины судна (длины продольной оси грузовой ватерлиніи) и чрезъ центръ водоизмѣщенія, т. е. центръ тяжести объема вытѣсняемой судномъ воды.

Площади поперечныхъ сѣченій подводнаго корпуса судна, т. е. площади шпангоутовъ его, обыкновенно убываютъ въ извѣстныхъ пропорціяхъ отъ плоскости мидельшпангоута къ обоимъ концамъ судна; но случается, что на нѣкоторой средней части длины своей судно имѣетъ равныя площади шпангоутовъ наибольшей величины, тогда за плоскость мидельшпангоута принимается плоскость шпангоута, проходящая чрезъ средину длины участка равно-великихъ площадей шпангоутовъ наибольшей мѣры.

Если (черт. 29) длина судна между концевыми *перпендикулярами*, т. е. между вертикалями, проведенными на чертежѣ въ діаметральной плоскости чрезъ концы оси наружной грузовой ватерлиніи, т. е. ватерлиніи на наружной поверхности обшивки, или, что то же, длина оси наружной грузовой ватерлиніи есть L , то плоскость мидельшпангоута отъ *кормоваго* перпендикуляра обыкновенно отстоитъ на $0,45 L$ до $0,5 L$; а центръ водоизмѣщенія отъ того же перпендикуляра обыкновенно отстоитъ на $0,485 L$ до $0,515 L$.

Если судно имѣетъ равномерную осадку по всей длинѣ, то прямая касательная къ наружной продольной линіи дна судна (въ срединѣ длины его) параллельна плоскости плана, т. е. горизонтальна; если же судно имѣетъ неравнѣрную осадку по

длинѣ, т. е. сидитъ въ водѣ носомъ или кормою сравнительно больше, то прямая, касательная къ продольной наружной линіи дна его, наклонна внизъ въ сторону болѣе осадки (носа или кормы) и тогда говорятъ, что судно имѣетъ *дифферентъ* на носъ или корму, смотря по тому, чѣмъ оно сидитъ больше, носомъ или кормою. Расположеніе мидельшпангоута, болѣе близкое къ кормовому, чѣмъ къ носовому перпендикулярю, указываетъ на то, что кормовая часть корпуса судна имѣетъ болѣе широкія, болѣе полныя очертанія, а носовая—менѣе полныя очертанія и болѣе заостреніе. При этомъ, положеніе центра водоизмѣщенія судна въ плоскостяхъ шпангоутовъ, отстоящихъ отъ кормоваго перпендикуляра въ разстояніяхъ отъ $0,5 L$ до $0,515 L$, очевидно, возможно лишь въ томъ случаѣ, когда нагруженное судно имѣетъ большую осадку въ носовой части, т. е. *дифферентъ* на носъ; положеніе же центра водоизмѣщенія судна въ плоскостяхъ шпангоутовъ, отстоящихъ отъ кормоваго перпендикуляра на разстояніе менѣе $0,5 L$, очевидно, возможно при дифферентѣ на носъ, при дифферентѣ на корму и при равномерной осадкѣ: видъ осадки судна въ предѣлахъ сихъ положеній центра водоизмѣщенія зависитъ отъ принятаго положенія мидельшпангоута и принятой относительной полноты очертаній корпуса судна въ носовой и кормовой частяхъ.

3. Линіи шпангоутовъ у грузовой ватерлиніи представляютъ собою или вертикальныя прямыя или касательныя къ симъ прямымъ дуги круговъ большаго радіуса, описанныя изъ центровъ, взятыхъ на линіи пересѣченія плоскостей: плана и шпангоутовъ.

4. *Ватерлиніи, линіи шпангоутовъ, батоксы и рыбины* представляютъ собою вообще правильныя, плавныя, соотвѣтственно согласныя между собою кривыя. Хотя наивыгоднѣйшія очертанія этихъ кривыхъ еще неизвѣстны, тѣмъ не менѣе основныя пропорціи судна, отъ коихъ эти очертанія зависятъ, опредѣляются сообразно съ ниже слѣдующими требуемыми отъ судовъ качествами: *подъемною силою, остойчивостію, легкостію на ходу, поворотливостію и крѣпкостію.*

Подъемная сила судовъ.

Подъемная сила судна, т. е. способность его при данной глубинѣ погруженія въ воду, или какъ говорятъ, при данной *осадкѣ*, вмѣщать и поддерживать на плаву то или другое вѣсовое количество груза, очевидно, зависитъ отъ вѣса вытѣсняемой судномъ воды.

Если мы назовемъ черезъ P вѣсъ вмѣщаемыхъ судномъ грузовъ, т. е. подъемную его силу, черезъ p собственный вѣсъ судна, чрезъ W объемъ воды имъ вытѣсняемый, или, что то же, водоизмѣщеніе или

полный объем корпуса судна до грузовой ватерлинии и чрезъ δ вѣсь кубической единицы воды, то будемъ имѣть:

$$P + p = W \cdot \delta.$$

Откуда

$$P = W \cdot \delta - p,$$

Если объемъ воды, вытѣсняемый судномъ безъ груза, есть W_0 ; то, очевидно, $p = W_0 \cdot \delta$ и слѣдовательно:

$$P = W\delta - p = (W - W_0) \delta = W_1 \delta,$$

гдѣ W_1 есть не что иное, какъ объемъ части корпуса судна отъ линіи осадки его безъ груза, называемой *ватерлинією порожняго судна*, до грузовой ватерлинии.

Изъ приведенныхъ двухъ выраженій подъемной силы судна видимъ, что опредѣленіе этой силы сводится или къ опредѣленію полного водоизмѣщенія судна до грузовой ватерлинии, и исчисленію всего собственнаго вѣса судна, или къ опредѣленію лишь водоизмѣщенія судна въ предѣлахъ между ватерлиніями: *порожняго судна* и *грузового*.

Опредѣленіе полного водоизмѣщенія судна обыкновенно ведется слѣдующимъ образомъ. Составивъ въ проекціяхъ теоретическій чертежъ судна, наносятъ по шпангоутамъ толщину обшивки судна. Полную осадку судна, т. е. высоту его отъ нижней наружной грани дна до грузовой ватерлинии— H , дѣлятъ на четное число n равныхъ частей и черезъ точки дѣленія проводятъ горизонтальныя сѣкущія плоскости (параллельныя грузовой ватерлинии); строятъ линіи сѣченій этихъ плоскостей съ наружной обшивкой или ватерлиніи наружной обшивки, и вычисляютъ площади ихъ по формулѣ Симпсона

$$\omega = \frac{x}{3m} [y + y_m + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{m-2}) + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{m-1})],$$

гдѣ x —длина какой-либо площади ватерлинии по линіи сѣченія ея съ діаметральной плоскостью; y_0, y_1 и т. д. ширины площади этой ватерлинии по линіямъ параллельнымъ плоскости мидельшпангоута; m —четное число частей, на которое дѣлится исчисляемая площадь по длинѣ. Затѣмъ полный объемъ водоизмѣщенія опредѣляется также по формулѣ Симпсона

$$W = \frac{H}{3n} [\omega_0 + \omega_n + 2(\omega_2 + \omega_4 + \dots + \omega_{n-2}) + 4(\omega_1 + \omega_3 + \dots + \omega_{n-1})],$$

гдѣ H —полная осадка судна; n —четное число частей, на которое она раздѣлена и ω_0, ω_1 и т. д. площади ватерлиній. Такимъ же путемъ, очевидно, могутъ быть

вычислены водоизмѣненія судна W' , W'' , W''' и т. д., соотвѣтствующія разнымъ осадкамъ судна h' , h'' , h''' и проч. до H . Взявъ прямоугольныя координаты (черт. 28) и откладывая по оси YX въ какомъ-либо масштабѣ принятыя величины осадокъ судна h' , h'' и т. д. до H , а по оси XX въ какомъ-либо линейномъ масштабѣ соотвѣтствующія имъ величины $W'\delta$, $W''\delta$ и т. д., по пересѣченіямъ координатъ можно построить кривую, выражающую измѣненіе осадокъ судна въ зависимости отъ его нагрузки; кривая эта называется *кривою грузового размѣра* судна.

Если на сдѣланномъ такимъ образомъ чертежѣ грузового размѣра судна, ось ординатъ будетъ перенесена параллельно въ сторону положительныхъ абсциссъ на выраженную въ принятомъ линейномъ масштабѣ величину собственного вѣса судна p , то абсциссы кривой отъ новаго центра координатъ O' будутъ выражать величины *грузовъ, поднимаемыхъ судномъ* при разныхъ осадкахъ и абсцисса $O'a$ выразитъ подъемную силу судна $P = W_1\delta$, при осадкѣ его H .

Если (черт. 29) наибольшая ширина судна по миделю (въ плоскости мидельшпангоута) есть l , наибольшая длина его по діаметральной плоскости L и наибольшая осадка его — H , то объемъ параллелепипеда $= l L H$ — есть наибольшее возможное *водоизмѣненіе* судна, или, другими словами наибольшій *предѣлъ* его водоизмѣненія. Поэтому полное водоизмѣненіе каждаго судна можетъ быть выражено такъ:

$$W = \varphi (l. L. H).$$

гдѣ φ есть нѣкоторый числовой коэффициентъ всегда меньшій единицы, называемый коэффициентомъ *полноты* подводнаго очертанія судна.

Чѣмъ подводныя очертанія судна полнѣе, т. е. чѣмъ ближе онѣ къ параллелепипеду $l L H$; тѣмъ коэффициентъ φ больше, т. е. ближе къ 1.

Пользуясь такимъ выраженіемъ водоизмѣненія судна, подъемную его силу можно выразить такъ:

$$P = \varphi l L H \delta - p.$$

Изъ этого выраженія видно, что подъемная сила судна тѣмъ больше:

- 1) чѣмъ собственный вѣсъ судна (p) меньше,
- 2) чѣмъ *полнѣе очертанія* подводной части судна, т. е. чѣмъ ближе подводная его часть подходитъ къ параллелепипеду,

и 3) чѣмъ больше ширина судна (l), его длина (L) и осадка (H).

Наименьшій возможный предѣлъ вѣса судна опредѣляется въ зависимости отъ качествъ матеріаловъ, входящихъ въ составъ судна, и прочихъ условій его конструкціи, соотвѣтствующихъ требованіямъ достаточной крѣпкости и долговѣчности, при данныхъ условіяхъ его нагрузки и движенія.

Наибольшій возможный предѣлъ полноты очертаній подводной части судна опредѣляется, какъ мы увидимъ ниже, въ зависимости отъ требованій остойчивости и *легкости* судна на ходу.

Наивыгоднѣйшія соотношенія величинъ l , L и H опредѣляются, какъ мы увидимъ ниже, въ зависимости отъ требованій остойчивости, поворотливости, легкости на ходу и крѣпкости судна.

Предѣлы же каждой изъ сихъ величинъ въ отдѣльности опредѣляются данными условіями водянаго пути, а именно: осадка судна H не должна быть болѣе наименьшей *глубины* водянаго пути какъ въ ходовыхъ частяхъ, такъ и въ мѣстахъ необходимыхъ стоянокъ судна; ширина судна l и длина его L не должны превосходить тѣхъ предѣловъ, при коихъ еще возможно свободное плаваніе судна по данной ходовой полосѣ водянаго пути и, въ особенности, въ поворотахъ ея.

Остойчивость судовъ.

Остойчивостію судна называется способность его въ состояніи плаванія приходить въ положеніе равновѣсія относительно осей продольной и поперечной.

Плавающее судно находится въ равновѣсіи:

а) относительно продольной оси—когда центръ его водоизмѣщенія и центръ всей его тяжести (собственнаго вѣса и груза) находятся въ одной вертикальной продольной плоскости, а именно *диаметральной*,

б) относительно поперечной оси — когда центръ его тяжести и центръ водоизмѣщенія находятся въ одной вертикальной поперечной плоскости сѣченія, т. е. въ одной какой-либо плоскости шпангоута или какъ чаще всего бываетъ, въ плоскости мидельшпангоута.

Чтобы выразить условія и мѣру остойчивости какого-либо судна предположимъ, что, плавая и находясь въ покоѣ, судно имѣетъ оба центра (тяжести и водоизмѣщенія) на одной вертикали, а именно:

на линіи пересѣченія діаметральной плоскости съ плоскостью мидельшпангоута. Возьмемъ сѣченіе этого судна по мидельшпангоуту (черт. 30) и предположимъ сначала, что изъ двухъ центровъ (тяжести и водоизмѣщенія), находящихся на одной вертикали сего сѣченія— xx , центръ *тяжести* расположенъ ниже центра водоизмѣщенія.

Въ такомъ случаѣ судно будетъ обладать всегда *устойчивымъ равновѣсіемъ*, будетъ вполнѣ и безусловно *остойчиво*, потому что, будучи выведено изъ положенія равновѣсія, всегда будетъ стремиться возвратиться въ положеніе равновѣсія подѣ вліяніемъ силы тяжести.

Если, какъ это большею частью въ дѣйствительности бываетъ, центръ тяжести расположенъ выше центра водоизмѣщенія; то судно обладаетъ условною остойчивостью и, въ зависимости отъ очертаній своихъ и разстоянія между сими центрами, можетъ быть *остойчиво* или *не остойчиво*.

Такъ въ случаѣ (черт. 31), когда при качаніи судна центръ тяжести u и центръ водоизмѣщенія v , приходятъ въ положенія u' и v' , при коихъ вертикальная линія, проведенная чрезъ новое положеніе центра водоизмѣщенія v' пересѣкаетъ ось aa' въ точкѣ m , расположенной ниже центра тяжести u' , то судно не остойчиво, ибо на него дѣйствуетъ пара силъ (тяжести и водоизмѣщенія) $Q.mn$ въ сторону качанія и еще болѣе его опрокидываетъ. Если же при качаніи судна (черт. 32) центры тяжести и водоизмѣщенія приходятъ въ такія положенія u' и v' , что вертикаль, проведенная чрезъ точку v' , пересѣкаетъ ось aa' въ точкѣ m , расположенной выше центра тяжести u' ; то судно *остойчиво*, ибо на него дѣйствуетъ пара силъ $Q.mn$ въ сторону обратную качанію и возвращаетъ его въ положеніе равновѣсія.

Точка m въ обоихъ случаяхъ называется метacentромъ, а слѣдовательно можно сказать, что судно *остойчиво* когда *метacentръ* расположенъ выше центра тяжести *).

Остановимся на этомъ послѣднемъ случаѣ и найдемъ выраженіе момента пары $Q.mn$, который и представляетъ собою мѣру остойчивости судна относительно продольной оси, т. е. мѣру поперечной

*) Если центръ водоизмѣщенія находится выше центра тяжести, то условіе это всегда исполнено, т. е. метacentръ всегда выше центра тяжести.

оустойчивости судна. Предположимъ, что судно накренилось и вертикальная ось его ca отклонилась (черт. 33) отъ первоначальнаго положенія своего въ ca' на небольшой уголъ α , тогда будемъ имѣть

$$M = Q.mn = Q.m\varphi'. \sin \alpha.$$

гдѣ $Q = W\delta$, т. е. объему водоизмѣщенія умноженному на вѣсъ кубической единицы воды. Отложивъ на линіи ca' отъ точки φ' величину $\varphi'\epsilon'' = \epsilon\epsilon$, будемъ имѣть:

$$m\varphi' = m\epsilon'' - \varphi'\epsilon'' = m\epsilon'' - \epsilon\epsilon,$$

или, обозначивъ $m\epsilon''$ черезъ e и $\epsilon\epsilon$ черезъ β ,

$$m\varphi' = e - \beta,$$

а слѣдовательно:

$$M = W.\delta (e - \beta) \sin \alpha.$$

но

$$e = \frac{J}{W} *)$$

гдѣ J есть моментъ инерціи площади грузовой ватерлиніи относительно продольной оси ея а потому:

$$M = W\delta \left(\frac{J}{W} - \beta \right) \sin \alpha = \delta (J - \beta W) \sin \alpha.$$

*) Вѣсъ судна съ грузомъ остается безъ измѣненія, а слѣдовательно и водоизмѣщеніе судна при качаніи его не можетъ измѣняться; поэтому подводные объемы судна, соотвѣтствующіе площадямъ миделя dad' и $fa'f'$, равны между собою и объемы поясовъ судна, соотвѣтствующихъ площадямъ $f'cd_1'$ и fed_1 , также должны быть равны между собою, т. е.

$$\text{об. } fa'f' = \text{об. } dad' = W \text{ и об. } d_1cf = \text{об. } d_1'cf' = v.$$

Такъ какъ судно симметрично относительно діаметральной плоскости; то, при правильныхъ очертаніяхъ его и небольшомъ углѣ α , центры тяжести объемовъ треугольныхъ поясовъ d_1cf и $d_1'cf'$ будутъ проектироваться на линію ff' въ точки k и k' , равноудаленныя отъ точки c , т. е. удовлетворяющія условію $kc = ck'$. Проведемъ черезъ e'' вертикальную ось xx , обозначимъ объемъ судна, соотвѣтствующій площади $fa'd'$ черезъ v' и, предполагая центръ его тяжести въ точкѣ g , возьмемъ относительно оси xx моменты объемовъ v , v' и W , соотвѣтствующаго площади $fa'f'$ и соотвѣтствующаго площади $d_1a'd'$; уравненія этихъ моментовъ будутъ:

$$\text{об. } fa'f' . mn' = W.mn' = v' . n''g + v.ko,$$

$$\text{об. } d_1a'd_1' . o = W . o = v' . n''g - v . k'o = o,$$

Переходя къ параллелепипеду предѣльнаго водоизмѣщенія, т. е. обозначая W черезъ φLlH , мы можемъ также принять

$$J = \varphi' \cdot \frac{Ll^3}{12},$$

гдѣ φ' будетъ выражать коэффициентъ момента инерціи въ зависимости отъ полноты очертаній грузовой ватерлиніи: чѣмъ болѣе очертаніе этой линіи подходитъ къ прямоугольнику Ll , тѣмъ φ' больше и ближе къ 1.

Поэтому можемъ написать

$$M = \delta \left(\varphi' \cdot \frac{Ll^3}{12} - \beta \cdot \varphi \cdot LlH \right) \sin \alpha = \delta Ll \left(\frac{\varphi' l^2}{12} - \beta \cdot \varphi H \right) \sin \alpha.$$

Изъ этого уравненія мы видимъ, какія общія соотношенія размѣровъ и очертаній судна необходимы для его *остойчивости*, а также что мѣра *остойчивости* судна, т. е. моментъ пары, приводящей судно въ равновѣсіе (возстановляющей пары) растеть съ увеличе-

ибо v'' есть центръ тяжести объема $\partial_1 a' \partial_1'$. Вычитая второе уравненіе изъ перваго, будемъ имѣть

$$W \cdot mn' = v (ko + k'o) = v \cdot kk',$$

откуда

$$mn' = \frac{v}{W} \cdot kk';$$

но

$$mn' = me'' \cdot \sin \alpha = e \cdot \sin \alpha,$$

слѣдовательно

$$e \sin \alpha = \frac{v}{W} \cdot kk'$$

и

$$e = \frac{v \cdot kk'}{W \cdot \sin \alpha}.$$

Если мы возьмемъ какой-либо элементъ длины судна Δz (черт. 34) и обозначимъ соотвѣтствующую сему элементу ширину судна въ плоскости грузовой ватерлиніи черезъ y , то при малой величинѣ угла α (черт. 33) будемъ имѣть:

$$\Delta v = \frac{1}{2} \cdot \frac{y}{2} \cdot \frac{y\alpha}{2} \cdot \Delta z = \frac{y^2 \alpha}{8} \cdot \Delta z;$$

засимъ для того же элемента

$$kk' = 2 ck = 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{y}{2} = \frac{2}{3} y,$$

ибо разстояніе ck центра тяжести трехугольнаго элемента отъ вершины трехугольника c будетъ равно $\frac{2}{3}$ высоты его.

ніемъ специфическаго вѣса (δ) воды, въ которой судно плаваеъ, и съ увеличеніемъ угла *крена* (α) судна.

Это послѣднее обстоятельство указываетъ на то, что судно *остойчивое*, все-таки, можетъ отъ дѣйствія внѣшнихъ силъ легко и сильно наклоняться, быть *валжимъ*, и что отъ всякаго судна кромѣ *остойчивости* для удобнаго плаванія еще необходимо требовать: во 1-хъ, чтобы судно, находясь въ равновѣсіи, представляло возможно большее сопротивленіе дѣйствію наклоняющихъ его силъ: эта способность судна называется *устойчивостію* и бываетъ тѣмъ больше, чѣмъ менѣе возвышается центръ тяжести судна надъ центромъ его водоизмѣщенія, т. е. чѣмъ меньше β ; во 2-хъ, чтобы судно, будучи выведено изъ положенія равновѣсія, обладало способностью возвращаться къ положенію равновѣсія при опредѣленныхъ малыхъ углахъ крена, т. е. чтобы силы, приводящія судно въ поперечное качаніе, могли наклонять его не болѣе какъ на данную величину угла α . Требуемая степень *остойчивости* судна въ данной водѣ въ этомъ послѣднемъ отношеніи можетъ быть выражена нѣкоторою величиною:

$$C = \frac{M}{\delta \cdot \sin \alpha},$$

гдѣ M — моментъ внѣшнихъ силъ, дѣйствующихъ на судно, равный моменту пары, возстановляющей равновѣсіе судна.

δ — вѣсъ кубической единицы воды,

α — данный предѣльный уголъ крена.

Уголъ α обыкновенно отъ 2° до 15° .

А слѣдовательно:

$$\Delta v \cdot kk' = \frac{y^3 \cdot \alpha \cdot \Delta z}{12},$$

$$\text{и} \quad v \cdot kk' = \sum \frac{y^3 \alpha}{12} \cdot \Delta z = \alpha \sum \frac{y^3 \cdot \Delta z}{12},$$

т. е. $v \cdot kk'$ равно моменту инерціи площади *грузовой ватерлинии* относительно продольной оси, умноженному на числовую величину дуги колебанія, или, какъ говорятъ, *угла крена* судна α ; обозначивъ этотъ моментъ инерціи черезъ J и предполагая, какъ выше сказано, α небольшимъ, такъ что α можно принять $= \sin \alpha$, получимъ:

$$e = \frac{v \cdot kk'}{W \cdot \sin \alpha} = \frac{\alpha J}{W \cdot \sin \alpha} = \frac{J}{W}.$$

А слѣдовательно, зависимость пропорцій судна отъ требуемой степени его остойчивости будетъ выражаться уравненіемъ

$$Ll \left(\frac{\varphi' l^2}{12} - \beta \cdot \varphi \cdot H \right) = \frac{M}{\delta \cdot \sin \alpha} = C.$$

Отсюда мы видимъ, что поперечная остойчивость судна тѣмъ больше:

1) тѣмъ больше длина и ширина судна и тѣмъ полнѣе очертанія грузовой ватерлиніи

и 2) тѣмъ меньше возвышеніе центра тяжести надъ центромъ водоизмѣщенія судна, тѣмъ меньше осадка судна и тѣмъ менѣе полны подводныя очертанія его.

Если центръ тяжести судна находится ниже центра водоизмѣщенія, то β имѣетъ отрицательную величину, и элементы 2-го пункта получаютъ обратное значеніе, т. е. съ увеличеніемъ ихъ остойчивость судна увеличивается.

Вслѣдствіе сего въ отношеніи поперечной остойчивости наивыгоднѣйшее поперечное очертаніе судна будетъ: для случая, когда центръ тяжести его находится выше центра водоизмѣщенія,—показанное на черт. 35, и для случая, когда центръ тяжести ниже центра водоизмѣщенія,—показанное на черт. 36.

Если мы моментъ восстанавливающей пары или мѣру остойчивости судна (M) раздѣлимъ на произведеніе ($W \cdot \delta \cdot \sin \alpha \cdot H$), то получимъ мѣру остойчивости на единицу полного вѣса судна и на единицу его осадки, или, такъ сказать, *коэффициентъ поперечной остойчивости* данного судна въ данныхъ условіяхъ вѣшнихъ силъ, а именно:

$$B = \frac{M}{W \cdot \delta \cdot \sin \alpha \cdot H} = \frac{\delta (J - \beta W) \sin \alpha}{W \cdot \delta \cdot \sin \alpha \cdot H} = \left(\frac{J}{WH} - \frac{\beta}{H} \right)$$

или

$$B = \frac{\delta \cdot Ll \left(\frac{\varphi' l^2}{12} - \beta \varphi H \right) \sin \alpha}{\delta \cdot \varphi LlH \cdot \sin \alpha \cdot H} = \frac{\varphi' l^2}{12 \varphi H^2} - \frac{\beta}{H}.$$

Для двухъ судовъ, находящихся въ одинаковыхъ условіяхъ относительно вѣшнихъ силъ и при одинаковомъ углѣ крена равно остойчивыхъ,—будемъ имѣть:

$$\frac{\varphi_0' l_0^2}{12 \varphi_0 H_0^2} - \frac{\beta_0}{H_0} = \frac{\varphi_1' l_1^2}{12 \varphi_1 H_1^2} - \frac{\beta_1}{H_1}.$$

Если же суда эти кромѣ того имѣютъ одинаковую полноту образованія и находятся въ одинаковыхъ условіяхъ относительно возвышенія центра тяжести надъ центромъ водовзмѣщенія, т. е. если

$$\frac{\varphi_0'}{\varphi_0} = \frac{\varphi_1'}{\varphi_1} \quad \text{и} \quad \frac{\beta_0}{H_0} = \frac{\beta_1}{H_1},$$

то условія равной ихъ остойчивости въ одинаковыхъ условіяхъ выразятся уравненіемъ

$$\frac{l_0^2}{H_0^2} = \frac{l_1^2}{H_1^2} \quad \text{или} \quad \frac{l_0}{H_0} = \frac{l_1}{H_1}.$$

Продольная остойчивость судна, т. е. остойчивость его относительно поперечной оси симметріи путемъ такихъ же исчисленій, примѣненныхъ (вмѣсто плоскости мидельшпангоута) въ плоскости діаметральной, выражается уравненіемъ совершенно аналогичнымъ съ уравненіемъ поперечной остойчивости, а именно:

$$L \cdot l \left(\frac{\varphi'' L^2}{12} - \beta \varphi H \right) = C'.$$

Уравненіе это отличается отъ уравненія поперечной остойчивости лишь тѣмъ, что въ него входитъ моментъ инерціи площади грузовой ватерлиніи относительно оси поперечной, а не продольной, соотвѣтственно чему $\varphi'' L^2$ замѣняетъ собою величину $\varphi' l^2$.

Такъ какъ всѣ суда вообще имѣютъ длину (L) больше ширины (l), то очевидно судно остойчивое поперечно будетъ всегда еще болѣе остойчиво продольно. Коэффициентъ продольной остойчивости судна по предыдущему будетъ:

$$B = \frac{\varphi'' L^2}{12 \varphi H^2} - \frac{\beta}{H}.$$

Выведенныя нами условія остойчивости судна, находящагося на плаву въ неподвижной водѣ и не имѣющаго поступательныхъ движеній, называются *статическими* условіями остойчивости, или условіями *статической остойчивости* судна.

Условія остойчивости судна въ состояніи движенія и въ особенности въ движущейся и волнуемой водѣ такъ сложны, что не могутъ быть выражены точно во всей совокупности, и мы въ предѣлахъ нашего курса остановимся лишь на тѣхъ частяхъ сихъ усло-

вій, которыя имѣють практическое значеніе въ примѣненіи къ судамъ внутреннихъ водяныхъ сообщеній.

Первое начало остойчивости судна въ состояніи движенія есть начало такъ называемой *динамической остойчивости*, за мѣрило которой принимается та работа внѣшнихъ силъ, которая необходима для боковаго наклоненія судна на нѣкоторый уголъ крена α . Работа эта, по принципу Модслея, въ зависимости отъ элементовъ судна выражается работою вертикальнаго перемѣщенія всего груза судна на величину того измѣненія вертикальнаго разстоянія между центромъ тяжести и водоизмѣщенія его, которое происходитъ при поперечномъ наклоненіи судна на уголъ крена α .

Если мы предположимъ, что разстояніе между центрами тяжести и водоизмѣщенія судна въ положеніи равновѣсія его (черт. 37) $uv = \beta$ и что при кренѣ судна на уголъ α центръ тяжести его перешелъ въ u' , а центръ водоизмѣщенія находится въ v' , то вертикальное разстояніе между центрами водоизмѣщенія и тяжести въ положеніи крена будетъ Sv' , и измѣненіе разстоянія между сими центрами, происшедшее отъ крена, будетъ

$$= Sv' - \beta.$$

А слѣдовательно, если объемъ полного водоизмѣщенія судна есть W , и всѣхъ кубической единицы воды δ , то мѣра динамической остойчивости будетъ

$$D = W\delta (Sv' - \beta),$$

или

$$D = \delta (J - W\beta) \frac{\alpha^2}{2} *).$$

*) Отложивъ на линіи of отъ точки u' величину $u's'' = \beta$ и проведя чрезъ v'' горизонтальную линію xx получимъ

$$Sv' = Ss' + S's' = \beta \cos \alpha + S's',$$

и слѣдовательно

$$D = W\delta (Sv' - \beta) = W\delta [S's' - \beta (1 - \cos \alpha)].$$

Чтобы опредѣлить величину $S's'$, обозначимъ разстояніе линіи xx отъ поверхности воды чрезъ h , объемъ пояса aoc и равный ему объемъ пояса $a'od$ чрезъ v , объемъ $aodf$ чрезъ v' ; предположимъ, что центры тяжести объемовъ v находятся въ точкахъ g и g' , а объема v' въ точкѣ g'' , и возьмемъ моменты всѣхъ

Сравнивая этотъ выводъ съ выведеннымъ нами уравненіемъ статической остойчивости

$$M = \delta (J - W\beta) \sin \alpha,$$

мы видимъ, что въ предѣлахъ небольшихъ угловъ α :

$$D = \frac{M}{\sin \alpha} \cdot \frac{\alpha^2}{2} = M \cdot \frac{\alpha}{2}.$$

Итакъ мы видимъ, что въ предѣлахъ небольшихъ угловъ допускаемаго крена для проверки остойчивости судна, движущагося въ тихой водѣ, достаточно изслѣдовать его статическую остойчивость, чѣмъ на практикѣ обыкновенно и ограничиваются.

Остойчивое судно, находящееся въ тихой водѣ и получившее подъ вліяніемъ внѣшнихъ силъ нѣкоторое боковое наклоненіе (до угла крена α), будучи предоставлено самому себѣ, подъ вліяніемъ возстановляющаго момента не только придетъ въ положеніе равно-

объемовъ относительно линіи xx , тогда получимъ:

$$M. \text{ об. } afda' = W \cdot S'e' = v' \cdot g''n' - v (h - k'g'),$$

и

$$M. \text{ об. } cafd = v' \cdot g''n' - v (h + kg) = 0,$$

вычитая второе уравненіе изъ перваго, будемъ имѣть:

$$W \cdot S'e' = v (kg + k'g').$$

Но треугольники aoc и $a'od$ по предыдущему равны и $kg = k'g'$, а слѣдовательно

$$S'e' = \frac{v \cdot 2k'g'}{W}.$$

За симъ

$$k'g' = \frac{ok' \cdot \alpha}{2},$$

ибо g' (центръ тяжести) находится на линіи, дѣлящей уголъ α пополамъ, и

$$S'e' = \frac{v \cdot 2k'g'}{W} = \frac{v \cdot ok' \cdot \alpha}{W},$$

но по предыдущему

$$ok' = \frac{1}{2} kk', \text{ слѣд. } v \cdot ok' = \frac{v \cdot kk'}{2}.$$

Затѣмъ такъ какъ по предыдущему

$$v \cdot kk' = \alpha \cdot \Sigma \frac{y^3 \Delta z}{12} = J\alpha,$$

вѣсія, но перейдетъ его въ обратную сторону до нѣкотораго противоположнаго угла крена. Если мы предположимъ, что судно не встрѣчаетъ отъ воды препятствій своему качанію, то углы крена его въ ту и другую сторону будутъ равны, и оно будетъ качаться около нѣкоторой оси вращенія, въ родѣ маятника, безконечное время. Изслѣдованія оси вращенія поперечно качающихся судовъ показали, что ось эта въ дѣйствительности не имѣетъ постояннаго положенія, а непрерывно перемѣщается, т. е., другими словами, что поперечныя качанія судовъ въ дѣйствительности происходятъ около мгновенныхъ осей; но что для приблизительнаго математическаго изслѣдованія качанія судовъ за ось вращенія можно принимать продольную ось, проходящую чрезъ метацентръ судна.

Итакъ поперечно качающееся въ тихой водѣ судно можно уподобить физическому маятнику, имѣющему центръ вращенія въ *метацентръ*, и центръ качанія въ центрѣ тяжести судна; а потому время одного размаха судна (отъ одного угла крена до противоположнаго), или, какъ говорятъ, *періодъ качанія*, не принимая въ расчетъ сопротивленій воды, можетъ быть опредѣлено по формулѣ маятника, слѣдующимъ образомъ:

$$T = \pi \sqrt{\left(\frac{R^2}{m} + m\right) \frac{1}{g}},$$

гдѣ J моментъ инерціи грузовой ватерлиніи относительно продольной оси, то

$$S'e' = \frac{v \cdot ok' \cdot \alpha}{W} = \frac{v \cdot kk' \cdot \alpha}{2W} = \frac{J\alpha^2}{2W}.$$

Поэтому

$$D = W\delta [S'e' - \beta (1 - \cos \alpha)] = \delta \left[J \frac{\alpha^2}{2} - W\beta (1 - \cos \alpha) \right].$$

Но

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 2 \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 = \frac{\alpha^2}{2},$$

потому что по малости допускаемаго угла α можно принять

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2};$$

а слѣдовательно:

$$D = \delta \left[J \frac{\alpha^2}{2} - W\beta \frac{\alpha^2}{2} \right] = \delta \left[J - W\beta \right] \frac{\alpha^2}{2}.$$

гдѣ T —время размаха или періодъ,
 π —отношеніе окружности къ діаметру = 3,14,
 R —радіусъ инерціи судна относительно продольной оси, про-
 ходящей чрезъ центръ тяжести,
 m —возвышеніе метацентра надъ центромъ тяжести,
 g —ускореніе силы тяжести.

Такъ какъ m всегда весьма не велико, то дробью $\frac{m}{g}$ можно пренебречь и принять:

$$T = \pi \sqrt{\frac{R^2}{gm}}.$$

Но $m = e - \beta$,
 гдѣ по предыдущему:
 $e = \frac{J}{W}$ есть возвышеніе метацентра надъ центромъ водоизмѣщенія,
 β —возвышеніе центра тяжести надъ центромъ водоизмѣщенія,—
 а слѣдовательно:

$$T = \pi \sqrt{\frac{R^2}{mg}} = \sqrt{\frac{R^2}{g\left(\frac{J}{W} - \beta\right)}}.$$

Но такъ какъ, по принятымъ обозначеніямъ,

$$W = \varphi \cdot L \cdot l \cdot H,$$

$$\text{и } J = \varphi' \frac{Ll^3}{12},$$

и, сверхъ того, можно принять

$$R^2 = \frac{1}{12} [H^2 + l^2] \varphi_1,$$

гдѣ φ_1 — коэффициентъ квадрата радіуса инерціи по предѣльному параллелоипеду судна, зависящій отъ полноты очертаній судна;
 то слѣдовательно будетъ имѣть:

$$T = \pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12} (H^2 + l^2) \varphi_1}{g \left(\frac{\varphi' l^3}{12 \varphi H} - \beta \right)}} = \pi \sqrt{\frac{H (H^2 + l^2) \varphi_1 \varphi}{g (\varphi' \cdot l^2 - 12 \varphi H \beta)}}$$

Если мы возьмемъ судно данной поперечной остойчивости въ извѣстныхъ условіяхъ внѣшнихъ силъ, для коего

$$\frac{l}{H} = n_1 \text{ и } \frac{\beta}{H} = n_2, \text{ то будемъ имѣть:}$$

$$T = \pi \sqrt{\frac{H(1 + n_1^2) \varphi_1 \varphi}{g(\varphi' n_1^2 - 12\varphi n_2)}},$$

откуда видимъ, что T тѣмъ больше, чѣмъ больше осадка судна.

Опытъ показалъ, что сопротивленіе воды качанію судовъ уменьшаетъ дугу размаха, но не измѣняетъ періода качанія, т. е. времени сего размаха; поэтому формулу періода оказалось возможнымъ повѣрить наблюденіями, и наблюденія эти дали результаты, весьма близкіе къ получаемымъ изъ формулы.

Чѣмъ при одной и той же величинѣ размаха (удвоеннаго угла крена) періодъ (время размаха) больше, тѣмъ спокойнѣе плаваетъ судно.

Наибольшее вліяніе сопротивленія воды на уменьшеніе величины размаха судна достигается устройствомъ *киля*, т. е. выступающаго изъ очертаній дна судна *продольнаго ребра въ діаметральной плоскости*, а потому суда, предназначаемыя къ плаванію на водахъ, подверженныхъ волненію (на моряхъ и озерахъ), устраиваются (въ видахъ уменьшенія боковой качки) съ килями (черт. 38).

Болѣе или менѣе спокойное плаваніе судна во время волненія зависитъ отъ соотношенія періода волнъ (т. е. времени, въ которое гребень волны проходитъ пространство, равное длинѣ волны) къ періоду качаній судна. Такъ какъ ни точное исчисленіе внѣшнихъ силъ, могущихъ накренять судно въ плаваніи, ни точное исчисленіе періодовъ волнъ—невозможны; то размѣры и пропорціи проектируемыхъ судовъ относительно остойчивости должны быть повѣряемы по размѣрамъ существующихъ хорошихъ судовъ, плавающихъ въ тѣхъ же условіяхъ, которыя предполагаются для проектируемыхъ судовъ.

Поэтому:

1) Размѣры и пропорціи судовъ, предназначаемыхъ къ плаванію по рѣкамъ и каналамъ, относительно остойчивости можно опредѣлить по коэффициентамъ статической поперечной и продольной остой-

чивости существующихъ хорошихъ рѣчныхъ судовъ изъ уравненій:

$$\frac{\varphi' l^2}{12\varphi H^2} - \frac{\beta}{H} = B \text{ и } \frac{\varphi'' L^2}{12\varphi H^2} - \frac{\beta}{H} = B',$$

гдѣ B и B' суть величины коэффициентовъ, исчисленныя по размѣрамъ хорошихъ существующихъ судовъ того же назначенія.

2) Размѣры и пропорціи судовъ, предназначаемыхъ къ плаванію по озерамъ, подверженнымъ сильному волненію, — относительно остойчивости можно опредѣлять тѣмъ же путемъ по коэффициентамъ статической остойчивости существующихъ хорошихъ судовъ того же рода и, кромѣ того, слѣдуетъ повѣрять по уравненію періода качанія:

$$T = \pi \sqrt{\frac{H(1 + n_1^2) \varphi_1 \varphi}{g(\varphi' n_1^2 - 12\varphi n_2)}},$$

задаваясь величиною T , исчисленною по размѣрамъ и пропорціямъ хорошихъ существующихъ судовъ того же рода.

Легкость судовъ на ходу.

Сопротивленія, преодолеваемые движущимися по водѣ судами, могутъ быть раздѣлены на три категоріи:

1) сопротивленій, представляемыхъ водою, въ качествѣ относительно неподвижной, несвободно проницаемой, среды;

2) сопротивленій, происходящихъ отъ движеній воды, препятствующихъ движенію судна, т. е. отъ противныхъ движенію судна теченій и волненій;

и наконецъ 3) сопротивленій отъ воздуха, какъ относительно неподвижнаго, такъ и движущагося, т. е. отъ вѣтровъ.

Сопротивленія отъ воздуха неподвижнаго ничтожны, сопротивленія же отъ вѣтровъ имѣютъ значенія случайныя, исключительныя.

Сопротивленія отъ волненій и теченій воды вообще представляютъ собою явленія сложныя, не поддающіяся точному анализу и притомъ случайныя.

Изъ этого рода сопротивленій лишь сопротивленіе отъ теченія, прямо противоположнаго направленію движенія (курсу) судна, имѣетъ значеніе явленія опредѣленнаго и постоянно встрѣчающагося въ рѣкахъ; но это сопротивленіе весьма просто можетъ быть уподоблено

сопротивленію относительно неподвижной водяной среды, если мы въ движеніи судна будемъ разсматривать не абсолютную скорость, а относительную. Поэтому качества судна, соотвѣтствующія понятію «*лежкости его на ходу*», т. е. способности его двигаться въ водѣ съ опредѣленную скорость при наименьшей затратѣ движущей силы, опредѣляются лишь въ зависимости отъ сопротивленій несвободно проникаемой водяной среды, причемъ среда эта предполагается *относительно* неподвижною, т. е. въ основаніе изслѣдованій принимается не абсолютная, а относительная (къ водѣ) скорость движенія судна. Такъ, напримѣръ, если абсолютная скорость движенія судна есть v_0 , а абсолютная скорость теченія воды въ ту или другую сторону сравнительно съ курсомъ судна есть $\pm v_1$, то въ основаніе изслѣдованій принимается относительная скорость судна $v = v_0 - (\pm v_1)$. При скорости теченія направленной въ сторону движенія судна, v_1 имѣетъ положительную величину (знакъ $+$) и $v = v_0 - v_1$. При скорости теченія, направленной въ сторону противоположную движенію судна, v_1 имѣетъ отрицательную величину (знакъ $-$) и $v = v_0 + v_1$.

Наконецъ при отсутствіи теченія $v_1 = 0$, и $v = v_0$.

Экспериментальныя и математическія изслѣдованія сопротивленій водяной *относительно неподвижной* среды движенію судовъ производились до сихъ поръ преимущественно въ примѣненіи къ судамъ морскимъ.

Первыя изслѣдованія этого рода произведены въ прошломъ столѣтіи разными учеными и, главнымъ образомъ, по порученію французской Академіи Наукъ.

Въ основаніе первыхъ изслѣдованій было принято, что относительно неподвижная вода сопротивляется движенію въ ней судна силою инерціи своей массы, вслѣдствіе чего сопротивленіе, оказываемое водою судну, движущемуся съ нѣкоторою относительною скоростью v , можетъ быть выражено слѣдующимъ образомъ:

$$P = \gamma \cdot \delta \cdot \frac{Av^2}{2g},$$

гдѣ P —сила сопротивленія въ вѣсовыхъ единицахъ,

δ —вѣсъ куб. ед. воды,

A —площадь подводной части мидельшпангоута (площадь миделя),

v —относительная скорость,
 g —ускорение силы тяжести,
и γ —коэффициентъ, зависящій отъ формы судна.

Примѣняя къ сей формулѣ результаты опытовъ надъ движеніемъ плавающихъ параллелепипедовъ, д'Обюиссонъ нашелъ, что $\gamma = 1$, если длина параллелепипеда L не менѣе $5\sqrt{A}$, что при $L > 5\sqrt{A}$ $\gamma > 1$ и что, при той же величинѣ A , но съ значительнымъ уменьшеніемъ осадки параллелепипеда, γ значительно увеличивается.

Изъ этихъ выводовъ можно заключить: 1) что сопротивленіе воды движенію плавающего параллелепипеда состоитъ не изъ одного только *противодавленія* или *подпора* воды; 2) что къ сему сопротивленію прибавляется еще сопротивленіе отъ *супленія* частицъ воды съ подводной поверхностью параллелепипеда, растущее съ увеличеніемъ площади этой поверхности и 3) что сопротивленіе воды вообще зависитъ отъ соотношеній длины, ширины и осадки плавающего тѣла.

По опытамъ Боссю, д'Аламберта и Кондорсе, примѣненнымъ къ той же формулѣ, оказалось, что съ заостреніемъ передняго и задняго концовъ параллелепипеда симметричными вертикальными плоскостями, величина коэффициента γ уменьшается въ слѣдующихъ пропорціяхъ:

1) отъ заостренія передняго конца (носа) до

угла— 132° — 84° — 60° — 12°
на — 15% — 46% — 56% — 60% .

2) отъ заостренія задняго конца (кормы) до

угла— 96° — 48° — 24°
на — 11% — 14% — 16% .

и 3) отъ совмѣстнаго заостренія обоихъ концовъ—въ пропорціи еще большей.

По опытамъ Борда, примѣненнымъ къ той же формулѣ, оказалось, что отъ заостренія и криволинейнаго очертанія передняго конца (носа) параллелепипеда, коэффициентъ γ уменьшается слѣдующимъ образомъ: отъ заостренія симметричными вертикальными плоскостями до угла 60° на 48% ; при той же степени заостренія, съ ограниченіемъ круговыми, вертикальными, цилиндрическими поверхностями радіуса, равнаго ширинѣ параллелепипеда,—на 57% ; при

той же степени заостренія, но съ ограниченіемъ вертикальною эллиптической цилиндрическою поверхностью — на 61% (см. черт. 39).

Выводы Боссю, д'Аламберта, Кондорсе и Борда приводятъ къ тому заключенію, что сопротивленіе воды движенію параллелепипеда зависитъ въ значительной степени отъ очертаній и формъ его оконечностей (носа и кормы).

Произведенными за симъ многочисленными наблюденіями и изслѣдованіями установлена новая теорія сопротивленій неподвижной воды движенію морскихъ судовъ, называемая теоріей «*струиныхъ сопротивленій*».

Сущность этой теоріи заключается въ томъ, что движущееся въ стоячей водѣ судно разсѣкаетъ воду, и струи воды, скользя по подводной поверхности судна, представляютъ его движенію троякаго рода сопротивленія: сопротивленіе давленія или *подпора*, сопротивленіе *сжатія* или тренія и сопротивленія вихревыя или *водоворотовъ*.

Наибольшее значеніе въ установленіи этой теоріи имѣютъ математическія изслѣдованія англійскаго профессора Ренкина и за симъ позднѣйшія экспериментальныя изслѣдованія англійскаго корабельнаго инженера Фруда (опубликованныя въ 1877—1879 годахъ).

Изслѣдованія Фруда были произведены надъ большими моделями морскихъ судовъ и хотя, за смертью экспериментатора, не были закончены, но дали основанія слѣдующимъ важнымъ выводамъ:

1) *Сопротивленіе тренія* на единицу площади подводной поверхности, при скоростяхъ движенія отъ 10 до 22 футъ въ 1 секунду, пропорціонально приблизительно квадрату скорости движенія, не зависитъ вовсе отъ формы подводной поверхности, но зависитъ отъ качествъ ея и длины; такъ, всякая крашенная желѣзная поверхность, длиною около 50 футъ, при скорости 10 ф. въ 1 секунду, испытываетъ среднее сопротивленіе въ $\frac{1}{4}$ фунта на 1 кв. футъ; съ увеличеніемъ скорости движенія, сопротивленіе это увеличивается пропорціонально квадратамъ скоростей; съ уменьшеніемъ длины поверхности, сопротивленіе это также увеличивается, но съ увеличеніемъ ея сверхъ 50 футъ—остается почти безъ измѣненія; если же поверхность покрыта наростами, то среднее сопротивленіе на 1 кв. ф. ея удваивается и даже утраивается. *Полное сопротивленіе тренія* судна равняется площади подводной поверхности судна, умножен-

ной на соответственное единичное (на единицу площади) сопротивление, и составляет, при чистой подводной поверхности и скоростях от 10 до 13 фт/сек въ 1 секунду, около 80—90% суммы всѣхъ сопротивлений; при тѣхъ же условіяхъ и скоростяхъ от 13 до 22 ф. въ 1 секунду—около 50—60% суммы всѣхъ сопротивлений, а при нечистой, покрытой наростами поверхности, — вообще значительно еще возрастаетъ.

2) *Сопротивленіе подпора* зависитъ главнѣйшимъ образомъ отъ пропорцій, формъ и очертаній подводной части судна; величина этого сопротивленія и отношеніе ея къ величинѣ сопротивленія тренія зависитъ отъ многочисленныхъ условій, изъ коихъ важнѣйшее значеніе имѣетъ соотношеніе скорости движенія судна къ длинѣ носоваго и кормоваго образованія (см. черт. 40-а и 40-б); если скорость движенія возрастаетъ за предѣлъ

$$v = 1,03 \sqrt{L_1 + L_2},$$

гдѣ L_1 длина носоваго
 L_2 длина кормоваго } образованія (причемъ обыкновенно $L_1 = L_2$),
 то сопротивленіе подпора возрастаетъ непомѣрно;

и 3) *Сопротивленіе водоворотное*, при обыкновенныхъ хорошихъ очертаніяхъ судна, весьма не велико и составляетъ не болѣе 8—10% величины сопротивленія тренія. Неправильное образованіе кормовой части въ значительной мѣрѣ увеличиваетъ сопротивленіе этого рода.

Для озерныхъ желѣзныхъ судовъ морскаго типа сопротивленіе воды (относительно неподвижной) опредѣляется приблизительно довольно просто и безъ большаго противорѣчія опытамъ Фруда слѣдующею эмпирическою формулою нѣмецкаго инженера—судостроителя Миддендорфа, составленною по теоріи извѣстнаго англійскаго судостроителя Нейстрема (Nystrom).

Если L — длина
 l — ширина } предѣльнаго параллелоипеда подвод. ч. с.,

A — площадь миделя (подводной части),

$\xi = \frac{W}{AL}$ — коэффициентъ полноты водоизмѣщенія,

F — площадь подводной поверхности судна,

v — скорость движенія (абсолютная въ стоячей и относительная въ текущей водѣ),

то, при измѣреніяхъ въ метрахъ и килограммахъ:

сопротивленіе подпора

$$P_1 = \frac{11 \cdot A \cdot L}{\sqrt{l^2 + mL^2}} \cdot v^{2,5},$$

гдѣ m — числовой коэффициентъ, при измѣненіяхъ ξ отъ 0,7 до 0,9, имѣющей величины отъ 2,00 до 0,02;

сопротивленіе тренія

$$P_2 = 0,17 F \cdot v^2;$$

и, пренебрегая водоворотными сопротивленіями, полное сопротивленіе

$$P = P_1 + P_2 = \frac{11 \cdot A \cdot l \cdot v^{2,5}}{\sqrt{l^2 + mL^2}} + 0,17 \cdot F \cdot v^2.$$

Для судовъ деревянныхъ *) сопротивленія тренія почти въ $1\frac{1}{2}$ раза больше сравнительно съ желѣзными.

Относительно сопротивленія воды движенію рѣчныхъ судовъ, существенно отличающихся отъ судовъ морскихъ *плоскостностью* и прочими очертаніями подводной части корпуса сдѣлано мало наблюденій и изслѣдованій; причемъ кромѣ того, всѣ произведенныя изслѣдованія приурочивались къ формулѣ одного подпорнаго сопротивленія.

Поэтому, а также вслѣдствіе крайняго разнообразія и несовершенства формъ рѣчныхъ судовъ, болѣе или менѣе рациональных формулъ для выраженія сопротивленій воды движенію ихъ не существуетъ.

Обыкновенно принимается, что всѣ сопротивленія воды движенію рѣчныхъ судовъ выражаются формулою:

$$P = \gamma \cdot \delta \cdot \frac{Av^2}{2g},$$

гдѣ всѣ величины имѣютъ выше объясненныя нами значенія.

Белинградъ (нѣмецкій инженеръ) даетъ для обыкновенныхъ деревянныхъ рѣчныхъ судовъ $\gamma = 0,04$ до 0,25; для пароходовъ хорошей конструкціи $\gamma = 0,15$.

Въ виду приведенныхъ нами результатовъ изслѣдованій д'Обюиссона, Боссю, д'Аламберта, Кондорсе, Борда и наконецъ Фруда, фор-

*) Некрашенныхъ, какъ обыкновенно бываетъ.

мула эта и коэффициенты Белинграта представляются весьма неточными. Кроме сего изъ результатовъ опытовъ тяги рѣчныхъ судовъ, произведенныхъ въ Россіи въ 1877 году на рѣкахъ Волгѣ и Шекснѣ, между прочимъ можно видѣть, что формула эта невѣрна для скоростей (v) менѣе 11 футъ въ секунду, а именно, что сопротивленія движенію рѣчныхъ судовъ (деревянныхъ), при скоростяхъ менѣе 11 футъ, растутъ пропорціонально не вторымъ, а меньшимъ степенямъ v , и зависятъ отъ площади подводной поверхности судна.

Нѣкоторые изслѣдованія относительно подпорнаго сопротивленія воды движенію судовъ показали, что сопротивленіе это значительно увеличивается при движеніи судна въ узкомъ каналѣ.

Обстоятельство это объясняется тѣмъ, что подпорное сопротивленіе воды выражается въ дѣйствительности образованіемъ нѣкоторой *подпорной волны* у носа судна, и величина его зависитъ отъ высоты этой волны. Въ широкомъ водномъ пространствѣ подпорная волна разливается и распространяется въ ширину и вслѣдствіе сего достигаетъ меньшей высоты; въ узкомъ же пространствѣ, встрѣчая препятствіе разлитію въ ширину, она увеличивается по высотѣ, и вмѣстѣ съ тѣмъ увеличивается и сопротивленіе движенію судна.

Дюбуа, на основаніи нѣкоторыхъ опытовъ, пришелъ къ заключенію, что чувствительная разница въ подпорномъ сопротивленіи воды судну въ каналѣ сравнительно съ свободнымъ пространствомъ обнаруживается, если площадь живаго сѣченія канала Ω менѣе, чѣмъ въ 6,46 раза, превосходитъ площадь миделя судна A , и для выраженія зависимости сего сопротивленія отъ размѣровъ канала въ предѣлахъ отношеній

$$\frac{\Omega}{A} = 2 \quad \text{и} \quad \frac{\Omega}{A} = 6,46$$

предложилъ слѣдующую формулу:

$$P' = P \cdot \frac{8,46}{\frac{\Omega}{A} + 2},$$

гдѣ P' — сопротивленіе въ каналѣ и P — сопротивленіе въ широкомъ пространствѣ.

Белингратъ, на основаніи того соображенія, что въ узкомъ каналѣ относительная скорость движенія судна v получаетъ какъ-бы

нѣкоторое приращеніе отъ уменьшенія площади живаго сѣченія канала на величину площади миделя судна, предложилъ слѣдующую формулу:

$$P' = P \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega - A} \right)^2 = P \left\{ \frac{\frac{\Omega}{A}}{\frac{\Omega}{A} - 1} \right\}^2 = P \left(\frac{n}{n - 1} \right)^2,$$

гдѣ $n = \frac{\Omega}{A}$.

Выводъ этой формулы основывается на слѣдующихъ соображеніяхъ. Имѣя судно, движущееся въ стоячей водѣ канала съ скоростью v , для опредѣленія сопротивленія воды мы можемъ предположить, что судно стоитъ неподвижно, а въ замѣнъ того движется вода въ каналѣ въ направленіи, противномъ движенію судна, со скоростью v . Если площадь живаго сѣченія канала есть Ω , то предполагаемый расходъ воды въ каналѣ передъ судномъ будетъ $= \Omega v$ и у миделя судна будетъ тотъ же самый, но $= (\Omega - A) v_1$; а слѣдовательно скорость движенія воды у миделя судна опредѣлится изъ уравненія:

$$\Omega v = (\Omega - A) v_1,$$

и будетъ:

$$v_1 = \frac{\Omega}{\Omega - A} \cdot v.$$

Поэтому будетъ:

$$P' = P \cdot \frac{v_1^2}{v^2} = \frac{P \left(\frac{\Omega}{\Omega - A} \cdot v \right)^2}{v^2} = P \left(\frac{\Omega}{\Omega - A} \right)^2 = P \left(\frac{n}{n - 1} \right)^2.$$

Формула Белинграта даетъ результаты довольно близкіе къ истинѣ.

По наблюденіямъ французскихъ инженеровъ, сопротивленіе движенію нѣсколькихъ одинаковыхъ судовъ, связанныхъ между собою и идущихъ одно за другимъ въ близкомъ разстояніи, выражается формулою:

$$\sum_N P = \frac{P(N + 1)}{2},$$

гдѣ $\sum_N P$ — полное сопротивленіе всѣхъ судовъ, P — сопротивленіе одного судна, N — число одинаковыхъ судовъ.

Подводя итоги всему сказанному о сопротивленіи воды движенію судовъ, можно сдѣлать слѣдующія обобщенія.

Полное сопротивленіе стоячей воды движенію судовъ морскаго типа, при скоростяхъ отъ 10 до 22 футъ въ 1 секунду, удовлетворяющихъ тому условію, что

$$v \leq 1,03 \sqrt{L_1 + L_2},$$

можетъ быть приблизительно выражено вообще въ функціи отъ одного сопротивленія тренія, а слѣдовательно отъ площади подводной поверхности и скорости, слѣдующимъ образомъ:

$$P = K \cdot F \cdot v^2,$$

гдѣ K — нѣкоторый числовой коэффициентъ, постоянный для судовъ извѣстнаго типа, F — площадь подводной поверхности, и v — скорость. За симъ, если мы обозначимъ черезъ p подводный периметръ мидельшпангоута, чрезъ A площадь подводной части мидельшпангоута, то будемъ имѣть:

$$\frac{A}{p} = r = \text{подводному радиусу мидель-}$$

шпангоута, и

$$p = \frac{A}{r}.$$

При этомъ площадь подводной поверхности можетъ быть выражена такъ:

$$F = \xi' p \cdot L = \xi' \cdot \frac{A}{r} \cdot L,$$

гдѣ ξ' — для судовъ извѣстнаго типа будетъ нѣкоторый числовой коэффициентъ, а слѣдовательно можно написать:

$$P = K \cdot F \cdot v^2 = K \xi' \cdot \frac{A \cdot L}{r} \cdot v^2.$$

Но мы имѣли

$$W = \xi \cdot A \cdot L.$$

Поэтому сопротивленіе на единицу объема водоизмѣщенія, которымъ собственно и измѣряется *легкость судна на ходу*, будетъ

$$\frac{P}{W} = \frac{K \cdot \xi' \cdot A \cdot L \cdot v^2}{r \xi \cdot A \cdot L} = \frac{K \xi'}{\xi} \cdot \frac{v^2}{r}.$$

Уравненіе это показываетъ, что, при данныхъ величинахъ коэффициентовъ ξ' , ξ и K судно тѣмъ *легче на ходу*, чѣмъ больше подводный радіусъ его мидельшпангоута.

Сопротивленіе воды движенію рѣчныхъ судовъ, какъ выше выяснено, въ дѣйствительности пропорціонально не квадрату, а пѣ-которой другой функціи относительной скорости движенія и состоитъ не изъ одного только сопротивленія подпора, а, по всей вѣроятности, изъ тѣхъ же элементовъ сопротивленія, которые выяснены для судовъ морскаго типа; поэтому, по аналогіи съ судами морскими, сопротивление воды движенію рѣчныхъ судовъ въ широкихъ пространствахъ можно выразить слѣдующимъ образомъ:

сопротивленіе тренія

$$P_1'' = F(\alpha v + \beta v^2) = \frac{\xi' LA}{r} (\alpha v + \beta v^2),$$

сопротивленіе подпора

$$P_2'' = A (\alpha_1 v + \beta_1 v^2),$$

и полное сопротивленіе, пренебрегая сопротивленіемъ водоворотовъ,

$$\begin{aligned} P'' &= P_1'' + P_2'' = \frac{\xi' LA}{r} (\alpha v + \beta v^2) + A (\alpha_1 v + \beta_1 v^2) = \\ &= \left[\left(\frac{\xi' L \alpha}{r} + \alpha_1 \right) v + \left(\frac{\xi' L \beta}{r} + \beta_1 \right) v^2 \right] A, \end{aligned}$$

гдѣ α , α_1 , β и β_1 суть числовые коэффициенты сопротивленій, подлежащіе опредѣленію изъ опытовъ, а прочія величины имѣютъ вышеобъясненныя значенія.

Сопротивленіе на единицу объема водоизмѣщенія рѣчнаго судна, выражающее мѣру легкости судна на ходу, поэтому будетъ:

$$\frac{P''}{W} = \frac{P''}{\xi AL} = \left[\left(\frac{\xi' \alpha}{r} + \frac{\alpha_1}{L} \right) v + \left(\frac{\xi' \beta}{r} + \frac{\beta_1}{L} \right) v^2 \right] \frac{1}{\xi}.$$

Изъ этого уравненія мы видимъ, что судно рѣчное, при данныхъ коэффициентахъ полноты его очертаній ξ' и ξ , будетъ по всей вѣроятности тѣмъ легче на ходу, чѣмъ подводный радіусъ мидельшпангоута и длина его больше.

Поворотливость судовъ на ходу.

Каждое судно въ своемъ движеніи по ходовой полосѣ водяного пути должно направляться къ цѣли соотвѣтственно условіямъ глубины, ширины, теченій, волненій и поворотовъ ходовой полосы. Для управленія движеніемъ судна служить обыкновенно *руль*.

Руль располагается за кормою судна и состоитъ изъ плоской деревянной или металлической лопасти, называемой *перомъ*, прикрѣпленной къ вертикальному стержню—тонкому валу, называемому *рудерписомъ*, имѣющему ось въ діаметральной плоскости судна и вращающемуся въ прикрѣпленныхъ къ судну *подшипникахъ* или *цапфахъ* (черт. 41а и 41б). Руль приводится во вращательное движеніе или непосредственно рычагомъ, прикрѣпленнымъ къ верхнему концу рудерписа и называемымъ *румпелемъ*, или посредствомъ дѣйствующихъ на тотъ же рычагъ особыхъ приспособленій: цѣпнаго привода и горизонтальнаго вала, называемаго *штурваломъ* (черт. 41в).

Когда судно движется по направленію своей діаметральной плоскости и перо руля находится въ этой плоскости, то руль не оказываетъ никакого направляющаго дѣйствія на судно; если же, при томъ же движеніи судна, перо составляетъ нѣкоторый уголъ α съ діаметральной его плоскостью и удерживается въ этомъ положеніи; то струи воды, скользя съ обѣихъ сторонъ и снизу судна, будутъ производить давленіе на руль. Въ силу этого давленія судно будетъ поворачиваться около вертикальной оси, проходящей чрезъ центръ его инерціи. Можно съ достаточною приблизительностію принять, что вращеніе это будетъ происходить около вертикальной оси, проходящей чрезъ центръ тяжести (а слѣдовательно и центръ водоизмѣщенія) судна.

Постараемся опредѣлить соотношеніе между площадью и угломъ положенія *пера* руля съ одной стороны и размѣрами и угломъ поворота двигающагося въ стоячей водѣ судна съ другой. Пусть будетъ:

v —скорость движенія судна, а слѣдовательно, и *пера* руля въ направленіи діаметральной плоскости,

F —подверженная давленію воды площадь *пера* руля; тогда нормальное давленіе на руль выразится такъ:

$$P = \frac{k \cdot \delta \cdot F \cdot v^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Это соотвѣтствуетъ тому предположенію, что скорости всѣхъ давящихъ на перо струй параллельны между собою и составляютъ съ плоскостью руля уголъ α (черт. 42). Хотя это предположеніе въ точности не соотвѣтствуетъ дѣйствительности; но, за неизвѣстностью дѣйствительныхъ направленій струй, въ видахъ упрощенія нашихъ приблизительныхъ выводовъ, оно можетъ быть принято.

Такъ какъ перо руля удерживается не безусловно неподвижно относительно судна; то можно предположить, что давленіе воды на перо руля передается судну въ цапфахъ, несущихъ рудерпшъ. Полагая при этомъ, что центръ тяжести (онъ же центръ вращенія судна) находится на срединѣ длины судна, получимъ моментъ вращенія (черт. 42).

$$M = Pb \cos \alpha = \frac{k \delta F v^2 \sin^2 \alpha \cdot \frac{1}{2} L \cos \alpha}{2g}.$$

Подъ вліяніемъ этого момента судно начнетъ вращаться сначала весьма медленно, затѣмъ, получая ускореніе вслѣдствіе постояннаго дѣйствія вращающей силы, по прошествіи времени t отъ того момента, когда руль былъ положенъ на уголъ α , достигнетъ нѣкоторой угловой скорости γ , и ясно, что чѣмъ меньше это время t , тѣмъ судно *скорѣе* слушается руля. Мы можемъ опредѣлить t на основаніи слѣдующихъ соображеній.

Вращенію сопротивляются: инерція судна и вода; сопротивленіе воды, очевидно, зависитъ отъ линейныхъ скоростей элементовъ подводной поверхности судна $v_x = x\gamma$ (черт. 42), и, при небольшой угловой скорости γ , не можетъ быть значительнымъ. Пренебрегая этимъ сопротивленіемъ, мы можемъ написать:

$$Mt = \gamma J,$$

гдѣ J — моментъ инерціи массы судна относительно оси вращенія. Предполагая, что вся масса судна сосредоточивается въ подводномъ его корпусѣ, мы можемъ выразить моментъ инерціи массы судна J въ функціи отъ геометрическаго момента инерціи подводнаго его корпуса относительно той же оси, J_1 , слѣдующимъ образомъ:

$$J = \frac{J_1 \delta}{g}.$$

Но J_1 въ свою очередь выражается въ функціи момента инерціи

предѣльнаго параллелепипеда подводнаго корпуса такъ:

$$J_1 = \varphi_{||} \frac{LlH}{12} \cdot (l^2 + L^2).$$

А потому:

$$J = \frac{\delta}{g} \varphi_{||} \frac{LlH}{12} (l^2 + L^2).$$

Подставляя найденныя значенія M и J въ уравненіе

$$Mt = \gamma J,$$

получаемъ:

$$\frac{k \delta F v^2 \sin^2 \alpha L \cos \alpha}{4g} \cdot t = \frac{\gamma \delta \varphi_{||}}{12g} LlH (l^2 + L^2),$$

откуда:

$$t = \frac{\gamma \varphi_{||} lH (l^2 + L^2)}{3k \cdot F \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \cdot v^2}.$$

Если положить $F = mLH$, гдѣ LH есть площадь предѣльнаго прямоугольника, соответствующаго подводной части діаметральной плоскости, и предположить $l = nL$, то получимъ:

$$t = \frac{\gamma \varphi_{||} n (1 + n^2) L^2}{3 kmv^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha}.$$

Эта формула показываетъ, что судно тѣмъ скорѣе слушается руля, чѣмъ длина его (L) меньше, чѣмъ отношеніе ширины его къ длинѣ (n) меньше, чѣмъ меньше полнота подводнаго очертанія ($\varphi_{||}$) и чѣмъ больше площадь пера руля сравнительно съ подводною діаметральною площадью судна (чѣмъ больше m).

Въ рѣчныхъ грузовыхъ судахъ длина пера въ 3—4 раза больше высоты его, и площадь пера составляетъ около $\frac{1}{30}$ подводной діаметральной площади судна.

По мѣрѣ возрастанія угловой скорости (γ) судна, сопротивленіе воды его вращенію, очевидно, будетъ возрастать и, когда моментъ сопротивленія воды сдѣлается равнымъ моменту силъ вращающихъ, угловая скорость сдѣлается постоянной, и каждому перемѣщенію центра тяжести судна въ единицу времени на постоянную вели-

чину v будетъ соотвѣтствовать поворотъ судна на уголъ γ . Для вывода зависимости между этой постоянной угловой скоростью γ , постоянною скоростью v и пропорціями судна и руля, предположимъ, что на судно, въ его діаметральной плоскости, дѣйствуетъ движущая сила Q , а въ центрѣ тяжести судна приложены двѣ силы взаимно противоположныя, равныя и параллельныя силѣ P , дѣйствующей на руль (черт. 43). Одна изъ этихъ силъ съ силою дѣйствующей на руль образуетъ пару вращающую судно, другая же съ силою Q даетъ равнодѣйствующую Q_1 , стремящуюся двигать судно по линіи AA' , составляющей нѣкоторый уголъ β съ діаметральной плоскостью судна. Если бы судно не встрѣчало сопротивленій въ массѣ воды, то центръ его тяжести получилъ бы движеніе по линіи AA' , но судно встрѣчаетъ сопротивленіе движенію какъ въ діаметральной плоскости, такъ и въ направленіи перпендикулярномъ къ ней. Равнодѣйствующая этихъ сопротивленій T вмѣстѣ съ силою Q_1 даетъ новую равнодѣйствующую Q_2 , составляющую съ линіею AA' нѣкоторый уголъ ϵ . Подъ вліяніемъ силы Q_2 , равнодѣйствующей силѣ движущей и сопротивляющихся, центръ тяжести судна опишетъ нѣкоторую криволинейную траекторію, касательную въ точкѣ a къ линіи AA' и по истеченіи единицы времени перенесется по дугѣ траекторіи на разстояніе $aa' = v$. Въ точкѣ a' діаметральная плоскость судна приметъ положеніе $d'f'$, составляющее съ начальнымъ положеніемъ (въ точкѣ a) уголъ γ . Если мы предположимъ, что силы, движущія судно и сопротивляющіяся его движенію, сохраняютъ во время всего движенія постоянныя величины и одно и то же положеніе относительно діаметральной плоскости судна, т. е. что равнодѣйствующая сила Q_2 во все время движенія сохраняетъ постоянную величину и уголъ ϵ по отношенію къ діаметральной плоскости судна, то во всякомъ новомъ положеніи судна его діаметральная плоскость будетъ составлять съ касательною къ траекторіи уголъ β , а составляющая силы Q_2 по нормали къ траекторіи будетъ

$$N = Q_2 \cdot \sin \epsilon = \frac{W v^2}{\rho} = \text{const.}$$

Откуда слѣдуетъ, что радіусъ кривизны траекторіи будетъ имѣть постоянную величину или другими словами, что траекторія будетъ дуга круга радіуса $R = aD$.

Опыты, произведенные надъ поворотными движеніями паровыхъ судовъ въ стоячей водѣ, показали, что траекторіи ихъ центровъ тяжести можно приблизительно принимать за дуги круговъ, а потому всѣ сдѣланныя нами предположенія возможны.

Въ такомъ случаѣ скорости воды v будутъ приблизительно составлять съ перомъ руля уголъ $\mu = \alpha - \beta$ (черт. 44), а слѣдовательно моментъ силы, давящей на руль, относительно центра тяжести судна по предыдущему напишется такъ:

$$M' = \frac{k\delta (m L H) \sin^2 (\alpha - \beta) \cos \alpha v^2 L}{4g}.$$

Далѣе, сопротивленіе воды вращенію судна на каждый элементъ діаметральной плоскости $h \cdot dx$, удаленный отъ центра тяжести на величину x , (черт. 45) выразится такъ:

$$dp = \frac{k'\delta (h dx) \gamma x^2}{2g},$$

такъ что полный моментъ сопротивленія будетъ:

$$2 \int_0^{+\frac{L}{2}} x dp = 2 \frac{k'\delta \gamma^2}{2g} \int_0^{+\frac{L}{2}} h x^3 dx.$$

Для интегрированія замѣнимъ h подъ интеграломъ нѣкоторой средней осадкой λH , гдѣ λ нѣкоторая правильная дробь; тогда получимъ:

$$\frac{k'\delta \gamma^2 \lambda H}{g} \int_0^{+\frac{L}{2}} x^3 dx = \frac{k'\delta \gamma^2}{64g} \lambda H L^4.$$

Условіе равенства моментовъ:

$$\frac{k\delta m L H \sin^2 (\alpha - \beta) \cos \alpha v^2 L}{4g} = \frac{k'\delta \gamma^2}{64g} \lambda H L^4$$

дастъ намъ:

$$\gamma^2 = \frac{16 km}{k' L^2 \lambda} \sin^2 (\alpha - \beta) \cos \alpha v^2;$$

и

$$\gamma = \frac{4v \sin (\alpha - \beta)}{L} \sqrt{\frac{km \cos \alpha}{k' \lambda}},$$

или приблизительно:

$$\gamma = \frac{4v \sin \alpha}{L} \sqrt{\frac{km \cos \alpha}{k' \lambda}}.$$

Отсюда слѣдуетъ, что γ тѣмъ больше, т. е. судно *тѣмъ поворотливѣе*, чѣмъ меньше длина (L), чѣмъ больше относительная скорость его хода v , чѣмъ больше площадь пера руля (отношеніе m) и чѣмъ меньше величина средней осадки по діаметральной плоскости (λ); для уменьшенія λ , въ видахъ увеличенія поворотливости судна, выгодно придавать очертаніе по діаметральной плоскости, представленное на черт. 46.

Изъ чертежа 43 мы видимъ, что радіусъ поворота $R = aD = a'D$ можетъ быть опредѣленъ изъ уравненія

$$R\gamma = v$$

такъ:

$$R = \frac{v}{\gamma}.$$

Кромѣ сего, если мы изъ центра D опустимъ перпендикуляръ Dk на продолженіе оси судна df , то точка k , находящаяся на этомъ продолженіи оси суда и отстоящая отъ оси вращенія его на нѣкоторую величину $ak = \eta L$, будетъ, при круговомъ движеніи центра тяжести судна, описывать также дугу круга около центра D ; и такъ какъ $\angle aDk = \beta$, то мы будемъ имѣть

$$\eta L = R \cdot \sin \beta,$$

откуда

$$R = \frac{\eta L}{\sin \beta}.$$

Если бы мы могли вычислить точно γ и β , соотвѣтствующія даннымъ величинамъ v и размѣрамъ судна и руля, то могли бы изъ приведенныхъ уравненій вычислить и величины R и η ; но опредѣлить величины γ и β вычисленіемъ невозможно, а потому и R вы-

числить нельзя. По сдѣланнымъ наблюденіямъ надъ паровыми судами оказывается, что обыкновенно $R = \text{отъ } 2L \text{ до } 3L$ и $\eta L = \text{отъ } \frac{1}{4} L \text{ до } \frac{1}{2} L$ и болѣе, а слѣд. изъ приведенныхъ выраженій имѣемъ приблизительно:

$$\frac{v}{\gamma} = 2,5L, \quad \text{откуда } \gamma = \frac{v}{2,5L},$$

и

$$\frac{\eta L}{\sin \beta} = 2,5L \quad \text{или} \quad \frac{\eta}{\sin \beta} = 2,5$$

откуда, при

$$\eta = \frac{1}{2},$$

$$\sin \beta = \frac{1}{2 \cdot 2,5} = \frac{1}{5}.$$

Изъ всего вышеизложеннаго мы видимъ, какими вообще мѣрами можно увеличить поворотливость судна, но при примѣненіи этихъ мѣръ необходимо имѣть въ виду, что излишняя поворотливость судна такъ же неудобна, какъ и недостаточная его поворотливость: судно, излишне поворотливое, дурно держитъ свой курсъ, т. е. при всякихъ слабыхъ боковыхъ усиліяхъ легко отклоняется отъ даннаго ему направленія движенія.

Поэтому, за неимѣніемъ ни практическихъ, ни теоретическихъ общихъ точныхъ данныхъ относительно надлежащей хорошей поворотливости судовъ, пропорціи вновь проектируемыхъ судовъ относительно поворотливости необходимо сравнить съ пропорціями испытанныхъ уже хорошихъ судовъ, подходящихъ по размѣрамъ и условіямъ движенія къ проектируемымъ.

Крѣпкость судовъ.

Судно, безъ поступательнаго движенія плавающее въ тихой водѣ, уже подвержено дѣйствію внѣшнихъ силъ, стремящихся произвести деформаціи въ его корпусѣ. Если же оно движется силою пара или тяги, или идетъ подъ парусами и при движеніи своемъ подвергается еще дѣйствію волненія или теченія воды, то въ корпусѣ его разви-

ваются значительныя дополнительные напряженія. Для приданія корпусу судна необходимой крѣпкости, т. е. способности переносить дѣйствіе внѣшнихъ силъ безъ искаженія формы, поломокъ и нарушенія прочности связей, всѣ части его должны быть исполнены изъ надлежащихъ матеріаловъ, съ такимъ расположеніемъ ихъ соотвѣтственно дѣйствію внѣшнихъ силъ, чтобы необходимая прочность корпуса во всѣхъ частяхъ совмѣщалась съ возможно меньшимъ его вѣсомъ.

Главнѣйшія напряженія корпуса судна могутъ быть классифицируемы слѣдующимъ образомъ:

- 1) напряженія отъ продольнаго изгиба корпуса;
- 2) напряженія отъ поперечныхъ деформаций его;
- 3) напряженія, вызываемыя ходомъ судна;

и 4) напряженія въ отдѣльныхъ частяхъ корпуса судна независимо отъ прочности и жесткости его какъ цѣлаго.

Продольный изгибъ судна имѣетъ слѣдующее происхожденіе: Представимъ себѣ боковой чертежъ судна, (черт. 47 а) находящагося въ равновѣсіи относительно плоскости XX , т. е. имѣющаго центръ тяжести и центръ водоизмѣщенія въ плоскости XX , и раздѣлимъ судно по длинѣ на нѣсколько равныхъ частей. Обыкновенно бываетъ, что полный вѣсъ каждой такой части судна не равенъ вѣсу вытѣсняемой ею воды, такъ что на каждую часть судна дѣйствуетъ вверхъ или внизъ нѣкоторая сила, равная разности вѣсовъ водоизмѣщенія и тяжести. Между всѣми такими силами W_1, W_2, W_3 и т. д., при равновѣсіи судна, существуютъ соотношенія, удовлетворяющія условіямъ:

$$\Sigma W = 0$$

$$\Sigma mW = \Sigma nW.$$

и корпусъ судна находится въ такихъ же условіяхъ, какъ брусъ на двухъ опорахъ подъ дѣйствіемъ вертикальныхъ силъ, а слѣдовательно подвергается изгибу, моментъ коего относительно плоскости XX есть:

$$M = \Sigma mW = \Sigma nW.$$

Корпусъ судна въ зависимости отъ соотношеній вѣсовъ и водоизмѣщеній частей его можетъ, очевидно, находиться и въ другихъ

условіяхъ, а именно: можетъ представлять собою брусъ, подпертый въ срединѣ и нагруженный на концахъ, или брусъ на нѣсколькихъ опорахъ, нагруженный въ пролетахъ.

Но во всякомъ случаѣ, изгибающіе корпусъ судна моменты будутъ тѣмъ больше, чѣмъ больше разнятся вѣса и водоизмѣщенія его частей, и будутъ увеличиваться съ увеличеніемъ длины его и въ особенности, когда судно подвергается волненію, вызывающему неравномѣрное погруженіе разныхъ частей его (черт. 48) въ воду, или же когда судно садится на мель.

Кромѣ сего корпусъ судна подверженъ продольному изгибу еще вслѣдствіе того, что равнодѣйствующая продольно-сжимающаго его давленія воды проходитъ не чрезъ центръ тяжести площади сжимаемаго поперечнаго сѣченія тѣла корпуса судна, а въ нѣкоторомъ разстояніи отъ него $\pm f$ (черт. 47 б); причемъ дополнительный моментъ продольнаго изгиба есть

$$M_1 = \pm Pf.$$

Напряженіямъ вытягиванія и сжатія отъ продольнаго изгиба корпуса судна подвергаются продольныя связи его, наружная обшивка и продольныя настилки, называемыя палубами.

Поперечные изгибы въ корпусѣ судна происходятъ отъ того, что въ каждой половинѣ судна, по обѣ стороны діаметральной плоскости (черт. 49), центръ тяжести и центръ водоизмѣщенія не находятся на одной вертикали, вслѣдствіе чего въ каждой половинѣ корпуса дѣйствуетъ пара силъ $\frac{Q}{2} \cdot t$, гдѣ Q полный вѣсъ судна. Эта пара

силъ стремится произвести поперечный изгибъ корпуса судна внутрь. Кромѣ сего боковыя давленія воды на корпусъ судна содѣйствуютъ этому изгибу.

Напряженіямъ отъ поперечныхъ изгибовъ корпуса судна подвергаются ребра шпангоутовъ и поперечныя связи между ними.

Ходомъ судна вызываются слѣдующія напряженія въ его корпусѣ. Предположимъ, что тяговая сила P приложена въ нѣкоторой точкѣ A (черт. 50) на линіи пересѣченія плоскости шпангоута XX съ діаметральной плоскостью и дѣйствуетъ въ діаметральной плоскости; обозначимъ сопротивленія движенію передней и задней части

судна относительно плоскости XX через P_1 и P_2 ; такъ какъ ихъ равнодѣйствующая

$$P_1 + P_2 = P$$

приложена ниже точки приложенія силы тяги, то получается пара Pt , производящая изгибъ корпуса относительно плоскости XX . Сверхъ того ясно, что передняя часть корпуса у плоскости XX будетъ еще сжата усиліемъ P_1 , а задняя у той же плоскости будетъ вытянута усиліемъ P_2 .

Добавочныя напряженія отъ хода судна являются дополнительными къ напряженіямъ отъ разсмотрѣннаго нами продольнаго изгиба.

Въ отдѣльныхъ частяхъ судна проявляются еще напряженія отъ непосредственно дѣйствующихъ на нихъ внѣшнихъ силъ; такъ наружная подводная обшивка судна въ промежуткахъ между ребрами подвергается напряженіямъ отъ непосредственнаго давленія воды, настилка и поперечины палубъ подвергаются напряженіямъ отъ давленій располагаемыхъ на нихъ грузовъ и т. д.

Вообще напряженія всѣхъ частей корпуса судна могутъ быть съ большею или меньшею вѣроятностью опредѣлены по правиламъ строительной механики, и на основаніи этихъ правилъ частямъ корпуса могутъ быть приданы обезпечивающіе ихъ прочность размѣры, соотвѣтствующіе даннымъ матеріаламъ и исчисленнымъ напряженіямъ.

Но такъ какъ всѣ внѣшнія силы, дѣйствующія на судно и его части, не могутъ быть опредѣлены теоретически съ достаточною точностью; то при проектированіи судовъ слѣдуетъ руководствоваться не только правилами строительной механики, но и практическими данными относительно размѣровъ частей въ существующихъ судахъ, оказавшихся на практикѣ хорошими.

Изъ сказаннаго нами относительно крѣпкости судовъ можно вывести слѣдующія заключенія:

1) Распредѣленіе груза въ суднѣ должно по возможности строго соотвѣтствовать водоизмѣщенію каждой части его корпуса. Очевидно, соблюденіе этого правила необходимо какъ при проектированіи судна — въ видахъ достиженія возможно меньшаго вѣса корпуса, при достаточной его прочности; такъ и во время службы судна — въ видахъ того, чтобы судно не подвергалось напряженіямъ, большимъ тѣхъ, на которыя оно рассчитано.

2) Продольныя напряженія въ корпусѣ судна вообще уменьшаются съ уменьшеніемъ отношенія длины судна къ его осадкѣ.

и 3) Поперечныя напряженія корпуса судна уменьшаются съ уменьшеніемъ отношенія ширины судна къ его осадкѣ, а также отъ равномернаго распредѣленія груза по ширинѣ судна и въ зависимости отъ выбора болѣе жесткой формы шпангоутовъ.

Формы, основныя пропорціи и размѣры судовъ внутреннихъ водныхъ путей.

Суда, употребляемыя на внутреннихъ водныхъ путяхъ, бываютъ весьма разнообразны въ зависимости отъ условій ихъ службы, отъ требуемаго срока ихъ службы и наконецъ отъ матеріала, изъ котораго они построены. Между судами внутреннего плаванія по своимъ существеннымъ особенностямъ различаются двѣ группы:

- 1) суда озерныя
- и 2) суда рѣчныя.

Суда озерныя по нѣкоторыхъ различіямъ въ конструкціи подраздѣляются на:

- а) суда самодвижущіяся—пароходы
- и б) суда грузовыя—парусныя и перемѣщаемыя тягою (буксируемыя).

Всѣ вообще озерныя суда по условіямъ своей службы должны противостоять случайностямъ волненія и обладать для этого слѣдующими качествами:

- 1) значительною крѣпостью корпуса;
- 2) значительною поворотливостью, ибо во время волненія озерное судно должно выбирать наивыгоднѣйшее направленіе относительно гребней волнъ, чтобы не быть опрокинутымъ;
- 3) значительною остойчивостью
- и 4) легкостью на ходу, ибо движеніе озернаго судна во время волненія совершается при особенно трудныхъ условіяхъ.

Но вмѣстѣ съ симъ озерныя суда вообще не стѣснены предѣломъ глубины осадки, за исключеніемъ, разумѣется, тѣхъ изъ нихъ, которыя должны заходить въ рѣки и приставать въ мѣстахъ, не представляющихъ достаточной глубины.

Наивысшія требованія относительно перечисленныхъ качествъ озерныхъ судовъ предъявляются къ *озернымъ пароходамъ*, потому что

они несутъ самую серьезную службу и по своему устройству дороже грузовыхъ судовъ. Они устраиваются обыкновенно изъ желѣза и имѣють очертанія: въ поперечномъ сѣченіи — показанное на чертежѣ 51 а, въ діаметральной плоскости — показанное на чертежѣ 51 б, и въ планѣ — показанное на чертежѣ 51 в; при этомъ киль (см. черт. 51 а) увеличиваетъ сопротивленіе ихъ боковымъ качаніямъ; криволинейное образованіе шпангоутовъ уменьшаетъ сопротивленіе ихъ движенію и увеличиваетъ поперечную ихъ крѣпкость; малая полнота подводнаго очертанія способствуетъ ихъ остойчивости; значительное заостреніе носа въ діаметральной плоскости и планѣ способствуетъ ихъ легкости на ходу и поворотливости. Между длиною L , шириною l и осадкой H въ этихъ судахъ соблюдаются обыкновенно слѣдующія пропорціи:

$$\frac{l}{H} = 2; \quad \frac{L}{l} = 6 \text{ до } 8.$$

Судамъ озернымъ *грузовымъ* придаютъ обыкновенно менѣе совершенныя формы и устраиваютъ ихъ изъ дерева; поперечный видъ ихъ бываетъ или по черт. 52, или по черт. 53, или наконецъ по черт. 54, если онѣ должны приставать въ мелкихъ мѣстахъ; въ планѣ и діаметральной плоскости имъ придаютъ формы, показанныя на черт. 55. Обыкновенно употребляемыя пропорціи озерныхъ грузовыхъ судовъ слѣдующія:

$$\frac{l}{H} = 2; \quad \frac{L}{l} = 4 \text{ до } 5.$$

Что касается вѣса корпуса, то относительно русскихъ озерныхъ грузовыхъ судовъ можно принять, что онѣ составляетъ 35 — 40% полезнаго груза (вмѣщаемаго судномъ).

Суда рѣчныя по различіямъ въ конструкціи также подраздѣляются на паровыя и грузовыя, причемъ послѣднія распадаются на два существенно различныхъ отдѣла: судовъ тяговыхъ и судовъ сплавныхъ.

Общее требованіе отъ всѣхъ рѣчныхъ судовъ — возможно меньшая осадка при данной подъемной силѣ. Крѣпкость корпуса не имѣетъ въ нихъ того значенія, какъ въ судахъ озерныхъ. Поворотливость важна для пароходовъ и сплавныхъ судовъ; легкость на ходу — для пароходовъ и тяговыхъ судовъ, для сплавныхъ же она не имѣетъ значенія.

Конструкція рѣчныхъ судовъ въ значительной степени зависитъ отъ продолжительности срока ихъ службы: если на данномъ водномъ пути грузовое движеніе совершается только въ одну сторону или если возвращеніе судовъ въ теченіи одной и той же навигаціи по дальности пути невозможно, то грузовыя суда устраиваются болѣе легкой конструкціи: на одну только навигацію и на одинъ путь. Такая постройка судовъ практикуется у насъ отчасти для Волжско-Невскихъ водныхъ системъ и на нѣкоторыхъ отдѣльныхъ рѣкахъ.

Рѣчные пароходы строятся обыкновенно желѣзные по типу черт. 56 при пропорціяхъ:

$$\frac{l}{H} = 2; \quad \frac{L}{l} = 10 \text{ до } 15;$$

если же водный путь представляетъ крутые повороты, то принимается $\frac{L}{l} = 6$ до 8, и $\frac{l}{H}$ соотвѣтственно увеличивается.

Грузовыя суда тягловыя соотвѣтственно предъявляемымъ къ нимъ требованіямъ легкости на ходу имѣютъ формы, показанныя на черт. 57, и пропорціи:

$$\frac{l}{H} = 3,3 \text{ до } 4; \quad \frac{L}{l} = 6 \text{ до } 8,5;$$

а при крутыхъ поворотахъ:

$$\frac{l}{H} = 4 \text{ до } 5; \quad \frac{L}{l} = 4 \text{ до } 6.$$

Сплавныя суда должны прежде всего быть достаточно поворотливы, потому что при сплавѣ руль дѣйствуетъ только подъ вліяніемъ избытка скорости движенія судна надъ скоростью теченія, каковой избытокъ всегда бываетъ не великъ.

Судамъ этого рода придаются или формы тяговыхъ судовъ (черт. 57), при требованіяхъ прочной конструкціи и значительной поворотливости *), или же, при отсутствіи значительныхъ требованій въ сихъ отношеніяхъ, формы, показанныя на черт. 58 а, б, в.

*) Поворотливость зависитъ отъ *формъ и пропорцій* судна; формы тяговыхъ судовъ, сообразуемая главнымъ образомъ съ требованіями *легкости на ходу*, представляются удовлетворительными и въ отношеніи *поворотливости*; въ сплавныхъ судахъ при тѣхъ же формахъ *поворотливость* увеличивается соотвѣтственными *пропорціями* ихъ корпуса.

Обыкновенно примѣняемыя пропорціи сплавныхъ судовъ суть слѣдующія:

а) при некрутыхъ поворотахъ пути

$$\frac{l}{H} = 4 \text{ до } 5; \quad \frac{L}{l} = 5 \text{ до } 6,$$

б) при крутыхъ поворотахъ, что гораздо чаще бываетъ, вслѣдствіе обычной извилистости сплавныхъ рѣкъ

$$\frac{l}{H} = 5 \text{ до } 6; \quad \frac{L}{l} = 4 \text{ до } 5.$$

Собственный вѣсъ русскихъ рѣчныхъ грузовыхъ судовъ составляетъ въ ‰ отъ полезнаго груза:

- для сплавныхъ судовъ легкой конструкціи. 8—16‰,
- » тяговыхъ легкой конструкціи. 17—25‰,
- » прочныхъ тяговыхъ судовъ 30—35‰.

Размѣры судовъ находятся, какъ сказано, въ зависимости отъ глубины, ширины и крутизны поворотовъ ходовой полосы водянго пути.

При опредѣленіи размѣровъ судовъ *въ длину и ширину* въ зависимости отъ условій ходовой полосы необходимо имѣть въ виду не только ширины и радіусы поворотовъ ходовой полосы, но и тѣ условія состоянія воды, въ коихъ будетъ происходить движеніе судовъ.

Движеніе судна по озеру во время сильнаго вѣтра и волненія вполнѣ безопасно лишь въ томъ случаѣ, когда судно, взявъ наилучшій, соотвѣтственно направленію волненія, курсъ, не вынуждается его значительно измѣнять; поэтому безопасная ходовая полоса по озеру должна имѣть такую ширину и такіе отлогіе повороты, чтобы во время сильныхъ вѣтровъ и волненій суда могли ее проходить свободно почти прямолинейными курсами. Изъ сего слѣдуетъ, что отношеніе размѣровъ судовъ (длины и ширины) къ ширинѣ и радіусамъ поворотовъ ходовой полосы въ озерахъ вообще не могутъ быть нормированы.

Для воды стоячей, неподверженной волненію, отношенія размѣровъ судна къ ширинѣ и радіусамъ поворотовъ ходовой полосы могли бы быть точно опредѣлены помощью начертанія въ ходовой полосѣ траекторіи центра тяжести судна (черт. 59) и положеній

судна въ разныхъ точкахъ его траекторіи; но мы не знаемъ въ точности ни величины радіусовъ траекторій, свойственныхъ судамъ въ поворотахъ, ни величины угловъ, которые оси ихъ могутъ составлять съ касательными къ траекторіямъ, а потому намъ остается пользоваться лишь приблизительными соображеніями.

Намъ извѣстно, что радіусъ поворотной траекторіи центра тяжести судна въ стоячей водѣ имѣетъ величину, равную двойной, тройной длинѣ судна, т. е. что

$$R = \text{отъ } 2L \text{ до } 3L.$$

Если радіусъ внутренней границы ходовой полосы (черт. 59) въ самомъ крутомъ ея поворотѣ

$$R_1 = \text{отъ } 2L \text{ до } 3L,$$

то ясно, что ходовая полоса будетъ удобна для поворотовъ судовъ длиною L , а потому можно принять для простоты, что въ стоячей водѣ отношеніе длины судовъ къ радіусамъ внутренней границы ходовой полосы должно выражаться условіями:

$$L \leq \frac{1}{2} R_1 \text{ и } R_1 \leq 2L.$$

Относительно необходимой ширины ходовой полосы (b) въ стоячей водѣ можно принять, что она должна быть такова, чтобы судно длиною L и шириною l могло сдѣлать въ ней полный оборотъ; условіе это будетъ удовлетворено, если ширина ходовой полосы будетъ не менѣе діагонали предѣльнаго прямоугольника плана судна, т. е. если

$$b \geq \sqrt{L^2 + l^2},$$

или еще лучше, если

$$b \geq L + l.$$

Въ текущей водѣ, въ рѣкѣ, въ особенности при движеніи судна внизъ по теченію, весьма важную роль играетъ расположеніе стрежня относительно границъ ходовой полосы; если направленіе стрежня не концентрично съ границами ходовой полосы (черт. 60) или проходитъ весьма близко къ какой-либо границѣ ея (черт. 61), то судно можетъ не пройти чрезъ поворотъ.

Условія свободного хода въ поворотахъ рѣки приблизительно будутъ одинаковы съ условіями свободного хода въ поворотахъ стоячей воды, если стрежень рѣки проходитъ въ срединѣ ходовой полосы ея и притомъ имѣетъ направленіе концентричное границамъ ходовой полосы.

Поэтому, если радіусъ кривой стржня есть R и наименьшее разстояніе стржня отъ внутренней границы ходовой полосы есть a (черт. 62); то условія свободного хода судовъ въ поворотѣ рѣки, аналогично съ условіями свободного хода въ стоячей водѣ, выражаются такъ:

$$L \leq \frac{1}{2} (R - a) \quad \text{и} \quad R \geq 2L + a;$$

$$b = 2a \leq L + l \quad \text{и} \quad a \leq \frac{L + l}{2}.$$

Эти условія ширины ходовой полосы текущей воды въ практическомъ примѣненіи къ рѣкамъ иногда представляются неудобными въ томъ отношеніи, что требуютъ или значительнаго сокращенія размѣровъ судовъ соотвѣтственно наименьшимъ ширинамъ хода, въ особенности въ крутыхъ поворотахъ стржня, или значительныхъ работъ по приспособленію рѣчного пути къ даннымъ размѣрамъ судовъ.

Во избѣжаніе этого рода неудобствъ, судоходная практика выработала нѣкоторые вспомогательные приемы, облегчающіе проходъ судовъ въ крутыхъ и узкихъ поворотахъ ходовой полосы, а также вообще въ поворотахъ ходовой полосы при неблагоприятныхъ теченіяхъ, и, благодаря существованію этихъ приемовъ, оказывается возможнымъ для наиболѣе крутыхъ поворотовъ рѣчного пути принимать условіе, чтобы

$$b = 2a \leq l + \frac{1}{4} L \quad \text{и} \quad a \leq \frac{l}{2} + \frac{1}{8} L.$$

Вспомогательные приемы, облегчающіе проведеніе судовъ чрезъ повороты воднаго пути, состоятъ въ слѣдующемъ:

а) При сплавъ и тягъ судовъ вообще.

1) Рабочіе, находящіеся на суднѣ, дѣйствуютъ въ случаѣ надобности не только рулемъ, но еще шестами и баграми и съ помощью ихъ заставляютъ судно совершить требуемый поворотъ въ данныхъ предѣлахъ.

2) Для той же цѣли служить такъ называемый *чигинь* или *коль*, опускаемый съ носовой части судна въ наклонномъ положеніи и упирающійся однимъ концомъ въ дно водянаго пути, а другимъ въ бортъ судна (черт. 63); во избѣжаніе поврежденія борта въ мѣстѣ упора чигиня подкладывается подъ его конецъ мягкая подкладка. Носъ движущагося судна, упершись бокомъ въ наклонно поставленный *чигинь*, заставляетъ голову чигиня описывать дугу круга около точки упора чигиня въ дно, какъ около центра и, вмѣстѣ съ тѣмъ, отклоняется силою собственнаго движенія и отпора чигиня въ направленіи нормальномъ къ дугѣ, описываемой головой чигиня. Повторительными постановками чигиня носъ судна можно отклонить въ ту или другую сторону на требуемую величину.

б) При сплавѣ судовъ.

3) Употребляются *потеси*, уже описанныя раньше; онѣ могутъ быть поставлены съ кормы или съ обоихъ концовъ судна, и сильнымъ дѣйствіемъ ихъ можетъ быть замѣнено слабое дѣйствіе руля.

4) Для направленія сплавныхъ судовъ при очень крутыхъ поворотахъ стрежня и большихъ скоростяхъ теченія употребляются такъ называемыя упругія заплывы (черт. 64, 65а, 65б и 66). Упругія заплывы представляютъ собою систему изъ двухъ линій обыкновенныхъ *запонецъ*, соединенныхъ между собою упругими связями изъ брусевъ.

Упругія заплывы располагаются у вогнутого берега; причемъ первая береговая запель ихъ обыкновенно состоитъ изъ прочно связанныхъ звеньевъ въ два бруса и укрѣпляется къ забитымъ у берега сваямъ; вторая, наружная или ударная запель состоитъ изъ прочно связанныхъ звеньевъ въ 4, 6 и даже 9 брусевъ, располагается параллельно береговой запони и соединяется съ нею съ верховаго конца наклоннымъ звеномъ на шарнирахъ и далѣе системою наклонныхъ брусевъ тоже на шарнирахъ. Подъ концами наклонныхъ соединительныхъ брусевъ у шарнировъ имѣются деревянные подушки или подкладки, препятствующія этимъ брусамъ совмѣщаться съ линіями запоней.

Изъ чертежа 64 видно, что если судно, гонимое теченіемъ, ударится о наружную запель; то упругіе брусья, упираясь въ подушки, должны будутъ согнуться, причемъ разстояніе между бере-

говой и ударной линіей уменьшится соотвѣтственно силѣ удара; возвращаясь засимъ въ свое первоначальное состояніе, упругіе брусья отбросятъ ударную запонь и вмѣстѣ съ нею судно отъ берега, и судно, подхваченное теченіемъ, скользя по ударной запони, направится въ поворотъ. Ударная запонь въ упругихъ заплывахъ должна имѣть очевидно совершенно гладкую наружную боковую поверхность, дабы суда могли свободно по ней скользить.

5) При широкой ходовой полосѣ, но при неблагопріятномъ направленіи теченія и большой его скорости, для способствованія правильнымъ поворотамъ сплавныхъ судовъ, можетъ служить такъ называемый *лотъ*. Лотъ представляетъ собою чугунный, въ видѣ невысокой призмы, довольно значительный (иногда до 200 пуд.) грузъ, къ которому прикрѣпляются двѣ веревки. Въ случаѣ надобности осторожнаго спуска судна, лотъ бросается съ носа судна; судно описываетъ около него дугу, становится впередъ кормою и тихо спускается въ такомъ положеніи внизъ по теченію, причемъ лотъ медленно тащится по дну рѣки, и движеніе судна направляется рулемъ и соотвѣтственнымъ натяженіемъ и опусканіемъ веревокъ, взятыхъ отъ лота на оба борта судна (черт. 67). Когда судно выйдетъ изъ поворота и вообще изъ того раіона, гдѣ дѣйствіе лота можетъ быть полезно, лотъ поднимаютъ и, при помощи руля, судно поворачиваютъ носомъ впередъ для дальнѣйшаго хода.

Вмѣсто лота можетъ быть иногда употребленъ обыкновенный якорь; при этомъ судно, ставъ на якорь и повернувшись кормою внизъ, спускается по мѣрѣ отпусканія якорнаго каната. Къ проведенію сплавныхъ судовъ въ поворотахъ можетъ быть въ нѣкоторыхъ случаяхъ примѣненъ и рысковой якорь.

в) При *тягѣ судовъ* въ поворотахъ примѣняются также нѣкоторыя спеціальныя мѣры, но о нихъ мы скажемъ въ отдѣлѣ «тяги судовъ».

Размѣры судовъ, кромѣ разсмотрѣнныхъ нами условій ихъ движенія, зависятъ еще отъ условій экономическихъ, т. е. отъ тѣхъ условій, коими опредѣляется *выгодность* перемѣщенія грузовъ на судахъ. Условія эти состоятъ въ слѣдующемъ.

Каждое судно, получая за провозъ грузовъ извѣстную сумму, должно ею покрыть всѣ расходы, вызываемые процессомъ перевозки; расходы эти состоятъ въ уплатѣ:

1) Процентъ роста и погашенія капитала, затраченнаго на первоначальное устройство судна.

Если обозначимъ затраченный капиталъ чрезъ A , годовой процентъ роста и погашенія его, опредѣляемый общими экономическими и коммерческими условіями страны въ данное время, чрезъ a , то ежегодный расходъ на ростъ и погашеніе капитала будетъ:

$$\frac{a}{100} A.$$

2) Содержаніе команды и рабочей силы съ приспособленіями на суднѣ; обозначимъ годовой расходъ на эту статью черезъ B .

3) Стоимость ремонта судна, каковая также выражается удобно въ видѣ нѣкотораго процента, положимъ b , отъ первоначально затраченнаго капитала; такимъ образомъ расходъ на ежегодный ремонтъ выразится такъ:

$$\frac{b}{100} A.$$

4) Стоимости нагрузки и выгрузки судна; этотъ расходъ можетъ быть выраженъ слѣдующимъ образомъ.

Если c есть средняя стоимость рабочаго дня нагрузки и выгрузки,

$$\text{т. е. } c = \frac{k + k_1}{2},$$

гдѣ k есть стоимость рабочаго дня нагрузки,

k_1 » » » » выгрузки,

если на нагрузку и выгрузку судна требуется m дней, и судно дѣлаетъ n оборотовъ въ навигацію; то годовой расходъ на нагрузку и выгрузку судна будетъ:

$$nmc.$$

5) Расходъ движущей силы.

Если предположимъ, что судно дѣлаетъ λ верстъ въ каждый ходовой день, что при этой скорости стоимость движущей силы на версту пути есть d , и что навигація продолжается M дней, то число ходовыхъ дней, очевидно, будетъ $M - mn$, а расходъ въ годъ на движущую силу будетъ:

$$(M - mn) \lambda d.$$

Прежде чѣмъ сложить всѣ элементы расхода, замѣтимъ, что если

разстояніе пунктовъ, между которыми судно совершаетъ рейсы, есть s , то судно, сдѣлавши n оборотовъ, пройдетъ путь $2ns$, приче́мъ

$$2ns = (M - nm) \lambda.$$

Изъ этого послѣдняго уравненія мы имѣемъ во первыхъ, что расходъ на движущую силу выражается еще въ видѣ

$$2nsd,$$

и во вторыхъ, что

$$n = \frac{M}{m + \frac{2s}{\lambda}}.$$

Если P —грузоподъемная сила судна, то за годъ оно перевезетъ Pn пудовъ груза, и эта перевозка обойдется въ слѣдующую сумму:

$$\Sigma = \frac{A}{100} (a + b) + B + nmc + 2nsd.$$

При данныхъ условіяхъ нагрузки и выгрузки, число дней, потребныхъ на эти работы, будетъ пропорціонально грузо-подъемной силѣ судна, т. е.

$$m = \alpha P.$$

Подставляя это значеніе m въ выраженіе Σ , имѣемъ:

$$\Sigma = \frac{A}{100} (a + b) + B + n\alpha P c + 2nsd,$$

и, раздѣляя на nP , получаемъ стоимость перевозки вѣсовой единицы груза:

$$\frac{\Sigma}{nP} = \frac{1}{nP} \left[\frac{A(a+b)}{100} + B \right] + \alpha c + \frac{2sd}{P}.$$

Но мы вывели, что

$$n = \frac{M}{m + \frac{2s}{\lambda}} = \frac{M}{\alpha P + \frac{2s}{\lambda}};$$

слѣдовательно:

$$\frac{\Sigma}{nP} = \frac{\alpha + \frac{2s}{\lambda P}}{M} \left[\frac{A(a+b)}{100} + B \right] + \alpha c + \frac{2sd}{P}.$$

При возрастаніи грузоподъемной силы P , стоимость судна возрастает, но въ меньшей пропорціи, чѣмъ P ; то же самое слѣдуетъ сказать и о расходѣ на команду и содержаніе приспособленій на суднѣ — B . Что касается величины s , то съ возрастаніемъ P она также возрастаетъ и особенно быстро, если для нагрузки и выгрузки употребляется сила людей; это происходитъ потому, что при нагрузкѣ судна приходится размѣщать въ немъ грузы соотвѣтственно требованіямъ правильнаго ихъ распредѣленія, и въ большемъ суднѣ размѣщеніе требуетъ большей работы, чѣмъ въ маленькомъ; кромѣ того, при большихъ судахъ вообще приходится перемѣщать грузы на большія разстоянія, что также увеличиваетъ работу нагрузки и выгрузки.

Что касается стоимости движущей силы d , то, при сплавѣ, $d = 0$, такъ какъ движущая сила даровая; за исключеніемъ этого случая, d возрастаетъ вмѣстѣ съ P , но притомъ различно, смотря по тому, служить ли движущей силой паръ, или сила людей и животныхъ. Въ первомъ случаѣ d возрастаетъ почти пропорціонально P , въ послѣднемъ же случаѣ d возрастаетъ *быстрее* P .

Всѣ эти замѣчанія позволяютъ сдѣлать слѣдующіе выводы относительно вліянія грузоподъемной силы судна P на выгодность передвиженія грузовъ въ судахъ:

При перевозкѣ грузовъ на большія разстоянія и при употребленіи паровой движущей силы, — *выгодно* увеличивать сколь возможно грузоподъемную силу судовъ. Въ самомъ дѣлѣ, при большемъ s , вліяніе втораго члена as въ уравненіи Σ будетъ ничтожно; первый же членъ этого уравненія, съ увеличеніемъ P , убываетъ, а третій остается постояннымъ, слѣдовательно Σ , съ увеличеніемъ P , убываетъ, т. е. расходы по перевозкѣ въ суммѣ уменьшаются. Этотъ выводъ остается въ силѣ, если s не очень велико, но за то s , т. е. стоимость нагрузки и выгрузки, мала, что можетъ имѣть мѣсто при механической нагрузкѣ и выгрузкѣ судовъ.

Если же стоимость нагрузки и выгрузки *с значительна*, а разстояніе перевозки s не велико, и притомъ движущей силой служить сила людей или животныхъ, то грузоподъемную силу судовъ P увеличивать сверхъ извѣстнаго предѣла *невыгодно*.

Практика показываетъ, что вообще наименьшій предѣлъ грузоподъемной силы судовъ, при которомъ перевозка грузовъ на судахъ

можетъ конкурировать съ другими способами ихъ передвиженія, есть $P = 3.000$ пуд.

Принимая эту норму и задавшись опредѣленнымъ типомъ судна, т. е. отношеніями *) $\frac{L}{l}$, $\frac{l}{H}$, $\frac{p}{P}$ и $\frac{W}{LlH} = \varphi$, изъ выраженія грузоподъемной силы:

$$P = W\delta - p = \varphi LlH\delta - p,$$

можемъ опредѣлить *наименьшую* выгодную въ экономическомъ отношеніи осадку судна H , а по ней и прочіе размѣры судна. Эта наименьшая выгодная осадка H оказывается для обыкновенныхъ рѣчныхъ судовъ равной 2,5 фут., а потому наименьшая глубина рѣки, необходимая для выгоды грузоваго судоходства, принимается въ 3,5 футъ = 0,50 саж., или шесть четвертей аршина. Въ озерахъ глубина и осадка судовъ опредѣляются обыкновенно въ футахъ, а въ рѣкахъ — въ четвертяхъ аршина.

Необходимость запаса глубины въ 1 футъ для рѣкъ объясняется слѣдующими соображеніями.

Судно на ходу садится глубже, т. е. получаетъ нѣсколько большую осадку чѣмъ въ неподвижномъ положеніи и, кромѣ того, часто получаетъ дифферентъ; а именно, суда, идущія въ стоячей водѣ или по теченію, со скоростями до 20 футъ, получаютъ дифферентъ на носъ, а при бѣльшихъ скоростяхъ — на корму.

Рѣчныя грузовыя суда, при обыкновенныхъ скоростяхъ ихъ движенія, идущія внизъ по теченію, всегда имѣютъ дифферентъ на носъ; но, идя противъ теченія, получаютъ дифферентъ на корму; этотъ дифферентъ на корму уменьшается однако же и можетъ совершенно уничтожиться, если судно движется тягою, производящею давленіе на носъ. Вообще увеличеніе осадки судовъ отъ хода въ носъ или кормѣ, при обыкновенныхъ скоростяхъ хода, бываетъ 4—5 дюймовъ, а потому съ увѣренностью можно принять, что въ рѣчныхъ судахъ наибольшее увеличеніе осадки отъ хода не можетъ превышать 6 дюймовъ; если прибавить еще 6" на могущіе оказаться на днѣ случай-

*) Нормальныя величины отношеній $\frac{L}{l}$, $\frac{l}{H}$ и $\frac{p}{P}$ приведены выше, а φ обыкновенно = отъ 0,8 до 0,9.

ные твердые предметы, то и получится вышеуказанный необходимый запасъ глубины пути, сравнительно съ осадкой, въ одинъ футъ.

Необходимый запасъ глубины противъ осадки судовъ въ водахъ, подверженныхъ волненію, какъ напр. въ озерахъ, долженъ быть больше и именно долженъ быть таковъ, чтобы судно, попавшее въ ложбину волны, не могло достигнуть дна своимъ килемъ; размѣръ такого запаса глубины, очевидно, опредѣляется высотой волнъ и можетъ быть признанъ вполне достаточнымъ, если онъ болѣе высоты волнъ.

Что касается максимальныхъ размѣровъ рѣчныхъ судовъ, то нужно замѣтить, что рѣчныя суда не уступаютъ иногда по своимъ размѣрамъ и грузоподъемной силѣ морскимъ судамъ средней величины. Суда, ходящія по Волгѣ съ осадкою въ 6 и болѣе четвертей, несутъ на каждую сажень своей длины, при тяжелой конструкціи, 900—1.000 пуд. и при легкой конструкціи—до 1.500 пуд.; а такъ какъ длина ихъ достигаетъ 40 саж., то, слѣдовательно, грузоподъемная сила ихъ можетъ быть до 60.000 пудовъ.

Такъ называемыя бѣяны (устраиваемыя на одну навигацію и плавающія на рѣкѣ Волгѣ при высокой водѣ съ осадкою до 20 четвертей) вмѣщаютъ до 5.500 пудъ груза на каждую сажень своей длины, а всего до 200.000 пудовъ.

Конструкція судовъ.

Конструкція судовъ внутренняго плаванія зависитъ отъ ихъ формъ, служебнаго назначенія и матеріаловъ, изъ коихъ они устраиваются.

Мы не станемъ входить въ подробности конструкцій разныхъ многочисленныхъ типовъ *) судовъ внутренняго плаванія, потому что это составляетъ предметъ не нашего курса, а спеціальной литературы судостроенія; въ дополненіе же ко всему нами сказанному о судахъ этого рода вообще дадимъ лишь понятіе о нѣкоторыхъ конструктивныхъ ихъ особенностяхъ, о нѣкоторыхъ главныхъ ихъ частяхъ и принадлежностяхъ, могущихъ имѣть практическое значеніе.

Въ конструкціи судовъ вообще, а слѣдовательно и судовъ внутренняго плаванія въ частности, имѣетъ значеніе возвышеніе *борта* надъ грузовой *ватерлиніею*.

*) Въ одной Россіи ихъ болѣе 80.

Въ судахъ озерныхъ возвышеніе борта надъ грузовою ватерлиніею дѣлается по примѣру морскихъ судовъ съ такимъ расчетомъ, чтобы надводный объемъ судна имѣлъ величину около 20—30% полного объема водоизмѣненія.

Въ судахъ рѣчныхъ, неподвергающихся волненію, возвышеніе борта надъ грузовою ватерлиніею сообразуется съ потребнымъ для груза помѣщеніемъ, съ размѣромъ судна и съ большею или меньшею необходимостью предохраненія груза отъ сырости: обыкновенная его величина (въ грузовыхъ судахъ) бываетъ отъ 1 до 3 футъ.

Рациональная желѣзная конструкція судна вообще отличается отъ деревянной въ слѣдующемъ.

Въ желѣзной конструкціи вся сила жесткости и крѣпкости корпуса судна, какъ цѣлаго, заключается въ скелетѣ или остовѣ его, состоящемъ изъ связанныхъ между собою поперечныхъ и продольныхъ реберъ; прикрѣпляемая къ этимъ ребрамъ сравнительно тонкая желѣзная обшивка служить лишь оболочкою, ограждающею внутреннее помѣщеніе судна отъ воды.

Въ деревянной конструкціи существенную часть корпуса составляетъ толстая обшивка, представляющая собою какъ бы скорлупу корпуса, сопротивляющуюся дѣйствію всѣхъ внѣшнихъ силъ; поперечныя же и продольныя ребра корпуса служатъ, главнымъ образомъ, связями его скорлупы. Это различіе между желѣзной и деревянной конструкціями ясно видно на чертежахъ 68 и 69.

Поперечныя и продольныя ребра скелета желѣзнаго судна обыкновенно представляютъ собою балки одно-или двутавроваго сѣченія; листовая желѣзная обшивка въ промежуткахъ между основными ребрами скелета иногда поддерживается еще промежуточными балочками изъ углового или тавроваго желѣза.

Вообще детали конструкціи желѣзныхъ судовъ и въ особенности судовъ внутренняго плаванія на столько просты, что мы не станемъ на нихъ останавливаться и перейдемъ къ деревяннымъ конструкціямъ.

Въ грузовыхъ деревянныхъ судахъ внутренняго плаванія наружная обшивка дѣлается изъ досокъ толщиною отъ $2\frac{1}{2}$ до $4\frac{1}{2}$ дюймовъ, при чемъ толщина досокъ сообразуется съ тѣми напряженіями, которымъ онѣ подвергаются въ разныхъ частяхъ корпуса. Доски обшивки прибиваются къ шпангоутамъ деревянными нагелями, а въ концахъ (у стыковъ) желѣзными гвоздями.

Стыки досокъ располагаются на шпангоутахъ въ перевязку (разстояніе между стыками поясовъ дѣлается около 2 арш.), и всѣ швы между досками тщательно проконопачиваются и сверху закрываются тонкими дощечками, называемыми *лостомъ*, или заливаются *тикомъ*.

Конструкція поперечныхъ реберъ (шпангоутовъ) судна зависитъ отъ ихъ очертанія.

При криволинейномъ очертаніи они устраиваются изъ брусчатыхъ криволинейныхъ косяковъ, связываемыхъ болтами или въ накладку, (черт. 70) или въ два ряда стыками въ перевязку (черт. 71).

При прямолинейныхъ очертаніяхъ они устраиваются изъ коронныхъ брусевъ, вытесанныхъ изъ бревенъ съ корневыми вѣтвями, располагаемыхъ кокорами (корневыми вѣтвями), поочередно, то къ одному, то къ другому борту; при чемъ къ концамъ брусевъ, не имѣющимъ кокоръ, прикрѣпляются приставныя кокоры (черт. 72 и 73); у бортовъ, соотвѣтственно требуемому ихъ возвышенію, кокоры нарощаются наставками изъ брусевъ.

Деревянные шпангоуты ставятся другъ отъ друга въ разстояніи отъ $\frac{1}{2}$ до $1\frac{1}{2}$ фут. и связываются между собою обшивкою и слѣдующими поясами изъ брусевъ:

1) *По дни судна.*

Въ діаметральной плоскости *килемъ*, (черт. 74) или *кильсономъ*, (черт. 75) или килемъ съ кильсономъ (черт. 76); брусъя эти нарубаются на шпангоуты и связываются съ ними болтами. Въ плоскодонныхъ судахъ для придаванія корпусу большей продольной жесткости иногда кладутся еще (черт. 77) боковые кильсоны—*a* и воротовые брусъя—*b*.

2) *Въ бокахъ* (черт. 77).

Продольными схватками, называемыми *бархоутными брусъями*—*c*, насадкою изъ бруса или толстой доски, называемой *бортовымъ брусомъ* или *планирной доскою*—*d*.

Кромѣ сего надъ бархоутами съ внутренней стороны нарубаются на шпангоуты и связываются съ ними болтами *привальный брусъ*—*g* и палубный поясъ или *ватервейсъ* *g'*. Борты судна (черт. 77) связываются между собою поперечными связями изъ брусевъ, называемыми *бимсами* *f*; *бимсы* врубаются лапами въ привальные брусъя и скрѣпляются со шпангоутами болтами; они кладутся другъ отъ

друга въ такомъ разстояніи, какое необходимо для поперечной связи судна (около 1—2 саж.) или какое нужно для поддержанія верхняго настила, такъ называемой *палубы* судна (около 0,5 саж.), если она устраивается.

По діаметральной плоскости бимсы поддерживаются брусомъ, такъ называемымъ *конемъ*, который насаживается на шипы стоекъ, поставленныхъ на кильсонъ.

Палуба настилается на бимсахъ изъ досокъ толщиною въ $2\frac{1}{2}$ дюйма, по подкладкамъ, со скатами для стока воды къ бортамъ; при чемъ въ палубномъ поясѣ дѣлаются отверстія и вставляются трубы для выпуска воды за бортъ.

Швы между палубными досками конопатятся и заливаются пикомъ.

Въ озерныхъ судахъ бортъ обыкновенно еще возвышается надъ палубою отъ 0,25 до 0,50 саж. (черт. 78); въ рѣчныхъ же планширь прямо кладется на палубный поясъ.

Иногда въ рѣчныхъ судахъ, если для груза требуется большое помѣщеніе, вмѣсто палубы устраивается кровля (черт. 79).

Въ кормѣ и въ носу судна, въ діаметральной плоскости, къ килю и кильсону посредствомъ кокорныхъ наугольниковъ, такъ называемыхъ *кницъ*, и болтовъ, прикрѣпляются брусъ, называемые *штевнями*: (черт. 80) въ носу—*форштевень* и въ кормѣ—*ахтерштевень*. Наружная обшивка и всѣ продольные пояса врубаются въ четверти, вынутыя въ штевняхъ, и прочно связываются со штевнями гвоздями и болтами.

Для помѣщенія груза, по дну судна, на подкладкахъ по шпангоутамъ, устраивается грузовой полъ (черт. 77) и бока судна обшиваются изнутри, иногда, досками.

Для приданія плоскодоннымъ судамъ большей продольной жесткости, въ бортахъ ихъ, между внутренними бархоутами и воротовыми брусьями, ставятся подкосы изъ брусевъ (черт. 81) или прикрѣпляются арочные пояса (черт. 82).

Кромѣ вышеописаннаго руля, прикрѣпляемаго къ *ахтерштевню*, необходимыми принадлежностями грузоваго судна представляются:

1) *Мачта*.

Она служитъ для прикрѣпленія *парусовъ* и *бичевы* для бичевой тяги, ставится нѣсколько впереди центра тяжести судна и укрѣпляется въ кильсонѣ и въ палубѣ.

2) *Вороты горизонтальные или вертикальные* (кабестаны).

Вороты и *кабестаны* небольшого размѣра самой простой конструкции ставятся на палубѣ у носа, а иногда у носа и кормы, съ цѣлью подъема якорей и подтягиванія судна на небольшія разстоянія.

3) *Кнехты*, т. е. деревянные выступы въ видѣ тумбъ, укрѣпляемые въ бортахъ у носа и кормы; кнехты служатъ для причала судна.

4) *Водоотливныя приспособленія*.

Приспособленія этого рода состоятъ изъ простѣйшихъ насосовъ и *леекъ* и необходимы на каждомъ суднѣ, на случай возможной его течи.

и 5) *Якоря* (одинъ или два на случай потери одного); *шесты*, *багры* и *снасти*, т. е. необходимое для разныхъ надобностей количество веревокъ и канатовъ.

§ 4. Тяга судовъ.

Самый первобытный способъ тяги судовъ есть тяга силою людей и животныхъ, идущихъ по берегу. Изъ животныхъ къ этой работѣ примѣняются преимущественно, а у насъ исключительно, лошади. Этотъ способъ называется *бичевою* *) тягою (потому что для осуществленія его употребляется тонкій канатъ, называемый *бичевою*) и заключается въ слѣдующемъ:

Одинъ конецъ длинной бичевы прикрѣпляется на извѣстной высотѣ къ мачтѣ судна (черт. 83), другой—передается на берегъ; къ нему припрягаются люди или лошади, которые идутъ по берегу впередъ и *тянутъ* за собою судно.

Чтобы мачта подъ вліяніемъ тяги не подвергалась значительному изгибающему усилю, мѣсто прикрѣпленія къ ней бичевы связывается съ кормою судна веревочнымъ тяжемъ; иногда, въ замѣнъ этого, бичева перекидывается чрезъ блокъ, прикрѣпленный на извѣстной высотѣ къ мачтѣ и концомъ своимъ закрѣпляется за корму.

На бичеву со стороны носа судна обыкновенно надѣвается кольцо, къ которому привязывается крѣпкая веревка перекинутая чрезъ блокъ,

*) По вѣдомству Путей Сообщенія и въ официальномъ языкѣ принято неправильное названіе — *бичевая*. См. Толк. Слов. Даля.

укрѣпленный къ носу судна; веревка эта называется *бурундукомъ*; натяженіемъ ея можно удерживать носъ судна на извѣстномъ разстояніи отъ бичевы въ планѣ и въ случаѣ надобности приблизить къ бичевѣ, т. е. вообще можно до извѣстной степени управлять движеніемъ судна въ поворотахъ ходовой полосы и при измѣненіяхъ въ направленіи тяги. Та полоса берега, по которой идутъ тягловые люди или лошади, называется *бичевникомъ*.

Само собою разумѣется, что бичевая тяга вообще примѣнима лишь на такихъ путяхъ, которые имѣютъ вблизи ходовой полосы берегъ съ *бичевникомъ*, удобнымъ для хода людей или лошадей, т. е. на каналахъ, на нѣкоторыхъ рѣкахъ и иногда на озерахъ у береговъ въ тихую погоду.

Условія хода судна подъ бичевою тягою въ стоячей водѣ суть слѣдующія:

Пусть въ планѣ (черт. 84) ось судна имѣетъ положеніе параллельное оси бичевника, причемъ бичева составляетъ съ осью судна и съ осью бичевника нѣкоторый уголъ α ; если горизонтальное усиліе натяженія бичевы есть R , то составляющія его будутъ: по оси судна — $R \cos \alpha$ и по нормали къ оси судна — $R \sin \alpha$. Усиліемъ $R \cos \alpha$ судно будетъ перемѣщаться впередъ въ направленіи своей оси, а усиліемъ $R \sin \alpha$ судно будетъ постепенно притягиваться къ берегу и по прошествіи нѣкотораго времени неизбежно пристаеетъ къ нему. Чтобы этого не случилось, т. е. чтобы центръ тяжести судна двигался постоянно въ направленіи параллельномъ оси бичевника, сопротивленіе воды движенію судна должно постоянно противудѣйствовать приближенію его къ берегу, а для этого ось судна должна составлять съ желаемымъ направленіемъ движенія центра тяжести судна нѣкоторый уголъ β .

Предположимъ, что посредствомъ руля и бурундука судно поставлено въ такое положеніе, что ось его составляетъ уголъ β съ желаемымъ направленіемъ движенія его центра тяжести и что центръ его тяжести движется въ желаемомъ направленіи со скоростью v ; тогда составляющія этой скорости будутъ: въ направленіи оси судна — $v \cos \beta$ и въ направленіи нормали къ ней — $v \sin \beta$; а слѣдовательно, сопротивленія воды движенію судна приблизительно будутъ: въ направленіи его оси

$$P_1 = Av^2 \cos^2 \beta$$

въ направленіи нормали къ ней

$$P_2 = Bv^2 \sin^2 \beta.$$

гдѣ A и B —нѣкоторыя постоянныя величины для одного и того же судна.

Сопротивленіе воды движенію центра тяжести судна параллельно оси бичевника, очевидно, будетъ:

$$P_3 = P_1 \cos \beta + P_2 \sin \beta = Av^2 \cos^3 \beta + Bv^2 \sin^3 \beta.$$

Сопротивленіе же воды движенію центра тяжести судна въ направленіи къ бичевнику, т. е. по нормали къ оси бичевника, будетъ:

$$P_4 = P_2 \cos \beta - P_1 \sin \beta = Bv^2 \sin^2 \beta \cos \beta - Av^2 \cos^2 \beta \sin \beta.$$

Для того, чтобы, при поступательномъ движеніи конца бичевы по оси бичевника, центръ тяжести судна двигался въ направленіи параллельномъ оси бичевника и не приближался къ бичевнику, необходимы слѣдующія уравненія силъ:

$$R \cos \alpha = P_3 = Av^2 \cos^3 \beta + Bv^2 \sin^3 \beta \quad . \quad . \quad (1)$$

и

$$R \sin \alpha = P_4 = Bv^2 \sin^2 \beta \cos \beta - Av^2 \cos^2 \beta \sin \beta. \quad . \quad (2)$$

Изъ этихъ двухъ уравненій сложениѣмъ и вычитаніѣмъ получаемъ:

$$R \cdot \sin (\alpha + \beta) = Bv^2 \sin^2 \beta \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

и

$$R \cdot \cos (\alpha + \beta) = Av^2 \cos^2 \beta \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Откуда

$$R = v^2 \sqrt{B^2 \sin^4 \beta + A^2 \cos^4 \beta} \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Изъ уравненія второго видно, что какъ бы ни былъ малъ уголъ α , уголъ β не можетъ быть равенъ нулю и долженъ быть тѣмъ больше, чѣмъ больше уголъ α .

Изъ уравненія 4-го видно, что сумма угловъ $\alpha + \beta$ должна быть менѣ 90° , такъ какъ при $\alpha + \beta = 90^\circ$ необходимая сила тяги для движенія центра тяжести судна параллельно оси бичевника дѣ-

лается бесконечно большою, т. е. желаемое движеніе судна вперед дѣлается невозможнымъ.

Изъ уравненій 1-го и 5-го видно, что потребная сила тяги тѣмъ больше, чѣмъ больше углы α и β и что вообще какъ сопротивленія движенію судна на бичевѣ, такъ и сила тяги бичевой значительно больше того сопротивленія, которое судно встрѣчаетъ, двигаясь въ направленіи своей оси подъ вліяніемъ тяги, совпадающей съ направленіемъ его движенія.

Величину дѣйствительныхъ сопротивленій воды бичевой тягѣ опредѣлить весьма трудно, а тѣмъ болѣе трудно дать точное выраженіе потребнаго усилія тягловцовъ; потому что величина этого усилія зависитъ не только отъ угловъ, составляемыхъ въ горизонтальной плоскости бичевою съ осью судна и съ направленіемъ движенія тягловцовъ, но и отъ угла составляемаго упряжнымъ концомъ бичевы съ горизонтомъ.

Чтобы усиліе тягловцовъ не было чрезмѣрно большимъ, уголь, составляемый упряжнымъ концомъ бичевы съ горизонтомъ долженъ быть $= 0$, уголь составляемый (въ горизонтальной плоскости) бичевою съ осью судна ($\alpha + \beta$) долженъ быть не болѣе 30° и уголь составляемый бичевою съ направленіемъ хода тягловцовъ долженъ быть не болѣе 15° .

Бичева въ вертикальной плоскости принимаетъ видъ цѣнной линіи (черт. 85), уравненіе коей есть

$$y = \frac{m}{2} \left(e^{\frac{x}{m}} + e^{-\frac{x}{m}} \right)$$

гдѣ

$$m = \frac{R}{p}$$

R — горизонтальная натянутость бичевы,

p — вѣсъ единицы длины бичевы,

e — основаніе неп. лог.

Если бичева пеньковая и соотвѣтствуетъ усилію тяги, т. е. если это усиліе вызываетъ въ ней напряженіе прочнаго сопротивленія, то при измѣреніяхъ въ саженяхъ и пудахъ можно приблизительно принять

$$m = \frac{R}{p} = 500.$$

Зная разстояніе траекторіи судна отъ оси бичевника— λ и задаваясь угломъ, составляемымъ бичевою съ осью бичевника α , мы можемъ опредѣлить горизонтальное разстояніе мачты судна отъ упряжного конца бичевы

$$X = \frac{\lambda}{\sin \alpha}.$$

Зная X мы можемъ вычислить Y , а слѣд. и

$$h = Y - m.$$

т. е. необходимое возвышеніе точки прикрѣпленія бичевы къ мачтѣ надъ упряжнымъ концомъ бичевы, при коемъ конецъ этотъ будетъ горизонталенъ.

Зная засимъ то возвышеніе упряжного конца бичевы надъ бичевникомъ, которое соотвѣтствуетъ удобной работѣ тягловцевъ, можно очевидно опредѣлить и необходимое для хорошей тяги возвышеніе точки прикрѣпленія бичевы къ мачтѣ надъ бичевникомъ.

Чтобы требованіе горизонтальности упряжного конца бичевы было исполнимо при практикуемой высотѣ мачтъ до 5 саж., поверхность бичевника не должна возвышаться надъ уровнемъ воды болѣе 2,5 саж.

Полезное дѣйствіе людей и лошадей въ бичевой тягѣ зависитъ отъ угла, составляемаго (въ горизонтальной плоскости) бичевою съ направлениемъ ихъ хода, отъ скорости тяги, отъ состоянія и удобствъ бичевника и наконецъ отъ числа впрягаемыхъ лошадей и людей; для каждой тягловой единицы оно тѣмъ меньше, чѣмъ больше число тянущихъ единицъ, чѣмъ хуже дорога бичевника, чѣмъ больше скорость тяги, и чѣмъ болѣе уголь составляетъ бичева въ горизонтальной плоскости съ направлениемъ хода тянущихъ.

Средняя нормальная скорость хода человѣка въ бичевой тягѣ, или, что тоже, средняя скорость бичевой тяги людьми въ стоячей водѣ, приблизительно равняется 1 футу въ секунду или 1 верстѣ въ часъ и въ сутки около 12—13 верстъ.

Съ такою скоростью и при всѣхъ благопріятныхъ обстоятельствахъ человѣкъ можетъ тянуть въ стоячей водѣ: работая въ числѣ 2—3 человѣкъ—3.000 пуд. груза въ суднѣ, работая въ числѣ 12—14 человѣкъ 1.500 пуд. и работая въ числѣ болѣе 15 человѣкъ около 1.000 пуд.

Съ увеличеніемъ скорости тяги полезное дѣйствіе тягловаго чело́вѣка убываетъ, приблизительно, обратно пропорціонально квадратамъ скоростей тяги; такъ, если при нормальной скорости тяги v полезное дѣйствіе одного чело́вѣка есть p , то при скорости тяги v_1 полезное дѣйствіе одного чело́вѣка будетъ

$$p_1 = p \frac{v^2}{v_1^2}.$$

Для воды стоячей v_1 выражаетъ увеличенную скорость хода тягловъ противу нормальной (v).

Для воды текущей со скоростью v_0 , при тягѣ противъ теченія со скоростью хода— v'

$$v_1 = v' + v_0$$

при тягѣ по теченію со скоростью хода v''

$$v_1 = v'' - v_0.$$

Средняя нормальная скорость хода лошади въ бичевой тягѣ, или, что тоже, средняя скорость бичевой тяги лошадьми въ стоячей водѣ, приблизительно равняется 2 футамъ въ 1 секунду или 2 верстамъ въ часъ и въ сутки около 25 верстъ.

Норму полезнаго дѣйствія лошади въ бичевой тягѣ весьма трудно установить; опытъ же показываетъ, что силу тяги русской лошади, при вдвое большей скорости тяги сравнительно съ людскою тягою, можно принимать приблизительно равною силѣ трехъ чело́вѣкъ, т. е. при нормальной скорости тяги (около 2 ф. въ 1 секунду) отъ 3.000 до 9.000 пудовъ. При употребленіи смѣнныхъ лошадей скорость тяги можетъ быть доведена до 3,5—4 верстъ въ часъ; но сила тяги одной лошади можетъ быть при этомъ не выше 6.000 пудовъ.

Изъ сказаннаго видно, что бичевая тяга съ пользою и удобствомъ можетъ быть примѣнима: преимущественно въ стоячей водѣ, въ текущей—при слабыхъ скоростяхъ теченія *) и вообще къ судамъ не большаго размѣра. Она можетъ быть выгодна и дешева сравнительно съ другими способами тяги лишь въ томъ случаѣ, когда полезное дѣйствіе одного чело́вѣка въ ней достигаетъ не менѣе 1.500 пудовъ, а полезное дѣйствіе одной лошади не менѣе 4.500 пудовъ.

*) По Гагену взводная тяга возможна при уклонѣ не болѣе 0,002.

Если примѣненіе бичевой тяги на естественномъ водяномъ пути встрѣчаетъ мѣстами незначительныя неудобства въ крутыхъ поворотахъ бичевника или въ большихъ скоростяхъ противнаго теченія; то эти мѣстныя неудобства устраняются слѣдующими приспособленіями.

Въ крутыхъ поворотахъ бичевника для соотвѣтственнаго направленія бичевы устанавливаются такъ называемые отводные блоки—*a* (черт. 86). Отводный блокъ представляетъ собою деревянный вертикальный валъ (черт. 87), вращающійся въ подшипникахъ.

Въ мѣстахъ слишкомъ большихъ скоростей противнаго теченія, на бичевникѣ устанавливаются *кабестаны* (вертикальные ворота) и бичева тянется кабестанами.

Но на многихъ рѣкахъ примѣненіе бичевой тяги встрѣчаетъ значительныя неудобства въ слишкомъ отдаленномъ расположеніи ходовой полосы отъ берега и въ такихъ переходахъ ея отъ одного берега къ другому, которые вызываютъ необходимость перехода или перевоза тягловыхъ людей и лошадей съ одного берега на другой. Всѣ этого рода неудобства и невыгоды бичевой тяги и въ особенности въ примѣненіи противъ сильнаго теченія и къ судамъ значительныхъ размѣровъ привели къ изобрѣтенію разныхъ видовъ *буксирной тяги*. Главное отличіе буксирной тяги отъ бичевой заключается, въ томъ, что тяга этого рода дѣйствуетъ на судно въ направленіи его движенія, т. е. вообще въ направленіи касательной къ его траекторіи.

Первымъ видомъ буксирной тяги представляется *тяга на завозныхъ якоряхъ* съ того самаго судна, которое требуется двигать;

вторымъ—*тяга коноводными машинами*;

третьимъ—*паровая кабестанная тяга*;

четвертымъ—*буксирная пароходная тяга*;

и пятымъ—*туэрная тяга*.

Тяга на завозныхъ якоряхъ заключается въ слѣдующемъ:

Впередъ судна, въ желаемомъ направленіи его движенія заводится на особой лодкѣ, называемой *завозней*, якорь съ длиннымъ канатомъ (иногда длиною до 600 саж.); якорь бросается на дно рѣки и завозня спускается внизъ по теченію къ судну по канату, конецъ коего отдается на судно. Принятый на судно канатъ навивается на приводимый въ движеніе людьми кабестанъ, стоящій на суднѣ и судно двигается впередъ. За симъ заводится второй якорь и судно,

подойдя къ первому якорю, начинаетъ тянуться за переданный ему канатъ отъ закинутого второго якоря; послѣ сего первый якорь подымають и вновь тѣмъ же порядкомъ завозятъ впередъ.

Такимъ образомъ судно тянется непрерывно попеременно то на одномъ, то на другомъ якорѣ.

Тяга на завозныхъ якоряхъ очень медленна и не выгодна; въ настоящее время она можетъ быть примѣнима лишь на короткихъ разстояніяхъ при отсутствіи другихъ болѣе выгодныхъ способовъ тяги.

Коноводная машина представляетъ собою деревянное судно большихъ размѣровъ съ помѣщеніемъ для лошадей и обширною палубою, на которой поставленъ конный кабестанъ, т. е. кабестанъ, приводимый въ движеніе лошадьми. Посредствомъ этого кабестана машина тянется впередъ на завозныхъ якоряхъ и тянетъ за собою на канатахъ, называемыхъ буксирами, грузовыя суда.

Коноводныя машины съ начала текущаго столѣтія были у насъ въ большомъ ходу на Волгѣ, но въ настоящее время съ развитіемъ пароходства вышли изъ употребленія.

Паровая кабестанная тяга производится съ такъ называемыхъ кабестанныхъ пароходовъ. Кабестанный пароходъ представляетъ собою небольшое паровое судно съ кабестаномъ, приводимымъ въ движеніе силою пара. Кабестанный пароходъ беретъ на буксиръ грузовыя суда и тянется вмѣстѣ съ ними посредствомъ своего пароваго кабестана на завозныхъ якоряхъ, которые завозятся на особыхъ маленькихъ пароходикахъ, называемыхъ *затѣжками*.

Съ усовершенствованіемъ конструкціи буксирныхъ пароходовъ паровая кабестанная тяга, какъ и конно-машинная, потеряла свое значеніе.

Пароходная буксирная и *туэрная* тяга представляются наиболѣе совершенными видами тяги; онѣ служатъ какъ бы дополненіемъ одна къ другой и при дальнѣйшихъ усовершенствованіяхъ особенно въ конструкціяхъ пароходовъ, нужно полагать, вытѣснятъ собою всѣ другіе виды тяги.

Въ настоящее время съ пароходною буксирною тягою можетъ еще конкурировать бичевая тяга, но въ тѣхъ только случаяхъ, когда условія пути особенно благопріятны для нея и неудобны для пароходной тяги.

Движущій механизмъ парохода обыкновенно состоитъ или изъ

лопатчатыхъ гребныхъ колесъ или изъ гребнаго винта, приводимыхъ во вращательное движеніе паровою машиною.

Гребныя колеса и винтъ, вращаясь, отбрасываютъ назадъ извѣстныя массы воды и реакція (сопротивленіе) отбрасываемой массы воды заставляеть пароходъ двигаться впередъ.

Колесные пароходы имѣютъ или два гребныя колеса (черт. 88), расположенныя у середины длины судна по обѣ стороны его корпуса, или одно гребное колесо (черт. 89), расположенное за кормою судна. Въ *двухъ-колесныхъ* пароходахъ ось вращенія колесъ находится всегда нѣсколько впереди центра тяжести судна и колеса насаживаются (черт. 90) или на одинъ общій горизонтальный валъ или на два отдѣльные горизонтальные вала, которые совпадаютъ осями и могутъ быть сообщены между собою въ одно цѣлое или, въ случаѣ надобности, разобщены. Гребныя лопатки располагаются по радіусамъ колесъ и устраиваются или неподвижными въ ободьяхъ колесъ или вращающимися на шарнирахъ, прикрѣпленныхъ къ ободьямъ колесъ *). Эта послѣдняя конструкція (черт. 91) имѣетъ цѣлю достиженіе того, чтобы гребныя лопатки вступали въ воду и выходили изъ нея приблизительно въ вертикальномъ положеніи, чѣмъ въ значительной мѣрѣ уменьшаются вредныя сопротивленія въ работѣ колесъ. Съ этою цѣлю лопатки соединяются шарнирными колѣнчатыми рычагами съ дискомъ *T*, который вращается на горизонтальной оси, прикрѣпленной внѣ центра колеса къ стѣнкѣ *кожуха* его, т. е. ящика, покрывающаго колесо сверху. Всѣ колѣнчатые рычаги, идущіе отъ лопатокъ, за исключеніемъ одного, соединяются съ дискомъ *T* шарнирами, одинъ же изъ нихъ укрѣпляется въ дискъ неподвижно и при вращеніи колеса вращаетъ дискъ.

Въ пароходахъ винтовыхъ гребной винтъ помѣщается за кормою судна (черт. 92) и представляетъ собою муфту съ радіальными винтовыми лопастями, насаженную на горизонтальный валъ, ось коего находится въ діаметральной плоскости судна; обыкновенный видъ гребнаго винта показанъ на черт. 93.

Чтобы найти приблизительное выраженіе движущей пароходъ силы представимъ себѣ (черт. 94), что въ массу стоячей воды погружена и удерживается неподвижно колѣнчатая труба *AB*, изъ конца коей *B*, имѣющаго площадь отверстія—*a*, изливается вода со

*) Система Моргана.

скоростью— v ; если въсь куб. единицы изливающейся воды есть— δ , то давлѣніе, производимое изливающейся водою на массу стоячей воды, будетъ $= \frac{\delta \cdot av^2}{2g}$ = той реакціи, которую стоячая вода представляетъ истеченію воды изъ конца трубы B .

Если бы труба AB не удерживалась неподвижно, а будучи ка-лимъ-либо образомъ подвѣшена, была предоставлена самой себѣ, то очевидно она начала бы двигаться въ сторону обратную истеченію воды изъ конца ея B , съ нѣкоторою скоростью u и давлѣніе произ-водимое истекающею изъ нея водою на массу стоячей воды, рав-ное реакціи стоячей воды, было бы $= \frac{\delta a (v - u)^2}{2g}$ = силѣ, дви-жушей трубу.

Примѣняя эти разсужденія къ колесному пароходу и обозначая чрезъ:

a — сумму площадей лопатокъ, одновременно давящихъ на воду;

v — линейную скорость центра давлѣнія лопатокъ или что тоже среднюю линейную скорость отходящей отъ лопатокъ воды;

u — относительную скорость движенія парохода;

k' — коэффиціентъ давлѣнія лопатокъ;

получимъ слѣдующее выраженіе движущей силы парохода.

$$F = \frac{k' \delta a (v - u)^2}{2g}.$$

Это выраженіе дано извѣстнымъ нѣмецкимъ профессоромъ Ред-тенбахеромъ и въ своемъ общемъ видѣ можетъ быть примѣнено и къ винтовому пароходу, если подъ v подразумѣвать среднюю ли-нейную скорость отходящей отъ винта воды.

Если абсолютная скорость движенія парохода есть u_0 и ско-рость теченія воды есть c , то при ходѣ парохода:

противъ теченія $u = u_0 + c$

по теченію $u = u_0 - c$

и въ стоячей водѣ $u = u_0$

а слѣдовательно общее выраженіе движущей силы парохода есть

$$F = \frac{k' \delta a [v - (u_0 \pm c)]^2}{2g}.$$

Въ этомъ выраженіи можно принимать слѣдующія теоретическія значенія v :

для колесныхъ пароходовъ при радіусѣ центра давленія лопатокъ r и при одномъ оборотѣ колеса въ теченіи t секундъ

$$v = \frac{2\pi r}{t}$$

для винтовыхъ пароходовъ при шагѣ винта h и n оборотахъ винта въ секунду

$$v = nh.$$

Изъ опыта оказывается, что между теоретическими значеніями v и относительными скоростями хода пароходовъ существуетъ опредѣленная зависимость, а именно:

въ колесныхъ пароходахъ

$$u = u_0 \pm c = 0,7v = 0,7 \cdot \frac{2\pi r}{t} \text{ приблизительно;}$$

въ винтовыхъ пароходахъ

$$u = u_0 \pm c = 0,8v = 0,8nh \text{ приблизительно.}$$

Если мы обозначимъ сопротивленіе движенію парохода чрезъ

$$P = Au^2 = A(u_0 \pm c)^2,$$

то сила *тяги* парохода будетъ

$$R = F - P = \frac{k'\delta a [v - (u_0 \pm c)]^2}{2g} - A(u_0 \pm c)^2.$$

Сила эта должна равняться сопротивленію всѣхъ буксируемыхъ пароходомъ судовъ, т. е. R должно быть ΣP_n .

Сила тяги парохода противъ теченія, какъ видно изъ выраженія ея

$$R = \frac{k'\delta a (v - u_0 - c)^2}{2g} - A(u_0 + c)^2$$

значительно убываетъ съ возрастаніемъ противной скорости теченія; а такъ какъ сопротивленіе движенію судовъ, при противномъ теченіи, также значительно возрастаетъ; то дѣлается совершенно понятнымъ, почему тяга судовъ буксирными пароходами противъ теченія возможна лишь при скоростяхъ противнаго теченія, не превосходящихъ извѣстнаго предѣла.

Пароходы старыхъ конструкцій не могли буксировать груженыхъ судовъ противъ теченія при уклонахъ потока около 0,0002 и скоростяхъ противнаго теченія около 3,5 футъ; обыкновенные пароходы настоящаго времени не могутъ надлежащимъ образомъ буксировать судовъ при скоростяхъ противнаго теченія свыше 6 футъ въ 1 секунду.

Средняя скорость тяги обыкновеннымъ буксирнымъ пароходомъ составляетъ 5 футъ въ 1 секунду или около 5 верстъ въ часъ. Буксирный пароходъ, встрѣчая мѣстное препятствіе въ сильномъ противномъ теченіи, долженъ или уменьшить число буксируемыхъ имъ судовъ или воспользоваться *помощью* другой тяги или, наконецъ, прибѣгнуть одновременно къ тому и другому способу борьбы съ теченіемъ. Въ такихъ случаяхъ буксирные пароходы обыкновенно пользуются помощью или конной бичевой тяги или кабестанной тяги на завозныхъ якоряхъ, если на нихъ имѣются паровые кабестаны.

На рѣкѣ Ронѣ (во Франціи) нѣкоторые буксирные пароходы (называемые *grarins*) снабжены особымъ большимъ колесомъ, съ желѣзными зубьями, которое помѣщается въ прорѣзѣ корпуса судна по діаметральной плоскости; колесо это, при встрѣчѣ сильнаго противнаго теченія (на перевалахъ), опускается на дно рѣки, приводится машиною парохода во вращательное движеніе и, зацѣпляясь своими зубьями за дно рѣки, производитъ энергичную тягу.

Буксируемые пароходомъ суда припрягаются къ нему: а) въ случаѣ тяги въ стоячей водѣ и противъ теченія—сзади, одно за другимъ въ разстояніи около 10 саж., однимъ (черт. 95) или двумя (черт. 96) буксирными канатами; причемъ два буксирные каната употребляются съ цѣлью лучшаго направленія судовъ въ поворотахъ ходовой полосы; б) въ случаѣ тяги внизъ по теченію—съ боковъ и сзади по нѣсколько въ рядъ (черт. 97) почти вплотную одно къ другому, съ тою цѣлью, чтобы по возможности ослабить ударъ судовъ другъ о друга при случайныхъ остановкахъ хода.

Полезная работа машины буксирнаго парохода выражается слѣдующимъ образомъ. Если скорость тяги, т. е. относительная скорость движенія *воза* (поѣзда изъ судовъ) есть u , сопротивление движенію судовъ есть ΣP_n и сопротивление движенію парохода есть— P то полное сопротивление движенію воза

$$F = \Sigma P_n + P$$

и полезная работа машины парохода

$$T_r = u \times F.$$

Индикаторная работа паровой машины парохода поэтому будет

$$T_{ri} = \mu . T_r = \mu . u . F$$

гдѣ μ есть обратная величина коэффициента полезнаго дѣйствія паровой машины, т. е. $\mu = \frac{1}{\varphi}$.

Обыкновенно $\varphi =$ отъ 0,5 до 0,66, а слѣдовательно

$$\mu = \text{отъ } 2 \text{ до } 1,5.$$

Индикаторная работа хорошей паровой машины въ паровыхъ лошадяхъ, при u въ футахъ и F въ пудахъ, поэтому будетъ

$$Ni = \frac{1,5u . F}{15} = 0,1uF \text{ паровыхъ лошадей.}$$

Колесные и винтовые буксирные пароходы имѣютъ слѣдующіе сравнительные недостатки и достоинства.

Двухъ-колесные пароходы при волненіи работаютъ неодинаково своими двумя колесами и потому на ходу поворачиваются, т. е. *рыскаютъ*; они требуютъ сравнительно съ винтовыми пароходами ходовую полосу большей ширины, но меньшей глубины и на поверхности воды разводятъ сильную волну, которая въ не широкихъ путяхъ вредно дѣйствуетъ на берега; при работѣ противъ теченія они теряютъ больше въ движущей силѣ, чѣмъ винтовые пароходы.

Одноколесные пароходы не *рыскаютъ*, требуютъ меньшей ширины ходовой полосы, чѣмъ двухъ-колесные, но въ поворотливости уступаютъ двухъ-колеснымъ пароходамъ, и въ особенности имѣющимъ раздѣльный валъ, дающій возможность помогать повороту большею работою одного колеса.

Пароходы винтовые, сравнительно съ колесными, представляютъ преимущество въ томъ, что обладаютъ болѣе сильнымъ и болѣе правильнымъ ходомъ, большею поворотливостью и требуютъ меньшей ширины ходовой полосы; но въ то же время они имѣютъ большую осадку сравнительно съ колесными пароходами и требуютъ сравнительно большей глубины въ ходовой полосѣ. Поэтому слѣдуетъ отда-

вать предпочтеніе винтовымъ пароходамъ во всѣхъ случаяхъ, когда глубина ходовой полосы допускаетъ надлежащее ихъ примѣненіе. Двухъ-колесные пароходы представляются болѣе удобными на мелководныхъ широкихъ путяхъ, неподверженныхъ волненію; одноколесные же болѣе удобны на такихъ неподверженныхъ волненію мелководныхъ путяхъ, ширина коихъ недостаточна для пароходовъ двухъ-колесныхъ.

Недостатокъ силы и малый коэффициентъ полезной работы паровыхъ машинъ привелъ къ изобрѣтенію особаго способа буксирной тяги, такъ называемаго *туаж*.

Идея *туаж* заимствована изъ кабестанной тяги, съ устраненіемъ того, что составляло главный недостатокъ этого вида тяги, а именно, съ устраненіемъ періодическаго *завоза* якорей и послѣдовательной укладки тяговаго каната.

Устройство *туаж* или туерной тяги заключается въ слѣдующемъ.

Въ тѣхъ конечныхъ пунктахъ водяного пути, между которыми предполагается перемѣщать суда туерною тягою, разъ навсегда кладутся прочные якоря и между якорями на всемъ протяженіи пути на дно его, по оси ходовой полосы, укладывается цѣпь, въ концахъ прочно прикрѣпленная къ якорямъ.

У мѣста отправленія судовъ цѣпь приподымается со дна водяного пути и накладывается на приводимый въ движеніе паровою машиною горизонтальный воротъ или блокъ, особаго устройства, находящійся на спеціальному суднѣ, называемомъ *туеромъ*. Перекивая цѣпь на своемъ воротѣ или блокѣ, туерь тянется по ней впередъ и тянетъ за собою припряженные къ нему на буксирахъ суда.

Туерь представляетъ собою прочное, обыкновенно плоскодонное, судно, совершенно симметричное относительно миделя, т. е. съ одинаковыми образованіями носа и кормы и потому могущее одинаково удобно двигаться въ направленіи оси своей въ противоположныя стороны. Съ обоихъ концовъ туерь снабжается съемными рулями, которые служатъ для управленія его ходомъ по цѣпи.

Иногда туерь снабжается такими приспособленіями, при помощи коихъ, въ случаѣ надобности, онъ можетъ быть вооруженъ гребными колесами или гребнымъ винтомъ и они будутъ приводиться въ движеніе находящеюся на немъ паровою машиною.

Такого рода приспособленія на туерьъ весьма важны въ томъ

отношеніи, что туеръ можетъ въ случаѣ надобности работать какъ буксирный пароходъ и, при случайномъ разрывѣ цѣпи, можетъ легко выйти изъ затрудненія.

Первоначальное устройство туера показано на черт. 98. Въ этомъ туерѣ воротъ состоитъ изъ двухъ одновременно вращающихся параллельныхъ горизонтальныхъ желобчатыхъ блоковъ (съ пятью желобками каждый). Тяговая цѣпь охватываетъ четыре раза оба блока и въ концахъ судна направляется особыми вращающимися вилками.

Туерный воротъ этого рода имѣетъ недостатки, которые главнымъ образомъ заключаются:

1) въ томъ, что блоки, навивающіе цѣпь, неравномерно изнашиваются и неравномерное ихъ изнашивание вызываетъ въ цѣпи значительныя добавочныя напряжения, и

2) въ томъ, что постановка туера на цѣпь и освобожденіе его отъ цѣпи сопряжены съ затрудненіями и возможны лишь въ извѣстныхъ только мѣстахъ, гдѣ имѣются ключи (соединительныя звенья), цѣпи.

Недостатки эти устранены въ системѣ туернаго блока бельгійскаго инженера Букье. Блокъ Букье въ первоначальномъ видѣ представляетъ собою сплошной чугунный шкивъ съ шестью упругими щипцами (черт. 99), выдвигаемый на особой рамѣ за бортъ судна (черт. 100).

Цѣпь захватывается тремя щипцами блока и съ восходящей стороны направляется къ нему роликами *N*, а съ нисходящей нажимается нажимнымъ блокомъ *M*. Пальцы щипцовъ блока стягиваются между собою, посредствомъ металлическихъ пластинокъ, болтами съ каучуковыми толстыми подкладками (*Q*).

Рама, поддерживающая (черт. 100) блокъ, передвигается по рельсамъ посредствомъ рукоятки *J*; при нѣкоторомъ сдвигеніи ея внутрь судна, блокъ разобщается съ рабочимъ валомъ, перестаетъ вращаться и цѣпь съ него можетъ быть удобно скинута; за симъ рама можетъ быть совсѣмъ задвинута внутрь судна.

Система Букье дѣлаетъ возможнымъ движеніе встрѣчныхъ туеровъ по одной и той же цѣпи, причемъ, очевидно, одинъ изъ встрѣчныхъ туеровъ для пропуска другого долженъ скинуть съ себя цѣпь.

Система Букье описаннаго устройства представляется удобопримѣнимою для небольшихъ усилій тяги. Въ примѣненіи къ болѣе значительнымъ усиліямъ тяги она подверглась нѣкоторымъ измѣ-

неніямъ какъ въ конструкціи блока, такъ и въ установкѣ его на суднѣ.

Недостатки быстрого изнашиванія цѣпи и туернаго блока устраняются, а также достигается возможность удобнаго хода встрѣчныхъ туеровъ по одной цѣпи, при всякихъ условіяхъ тяги, въ системѣ туера Бове. Система эта заключается въ примѣненіи *намагничиваемаго* электрическимъ токомъ туернаго блока. Цѣпь удерживается на блокѣ силою магнитнаго притяженія и можетъ быть удобно сброшена съ него при уничтоженіи магнитнаго притяженія.

Цѣпь, для возможности свободнаго наложенія ея на блокъ туера, должна, вообще, имѣть длину большую разстоянія между якорями по оси ходовой полосы на нѣкоторую величину, зависящую отъ возвышенія блока надъ дномъ водяного пути, т. е. отъ глубины водяного пути; въ обыкновенныхъ условіяхъ примѣненія туерной тяги, на не глубокихъ рѣкахъ и каналахъ, длина цѣпи дѣлается на 10% болѣе разстоянія между якорями по оси ходовой полосы.

Иногда вмѣсто цѣпи употребляется проволочный канатъ; въ такомъ случаѣ примѣняется блокъ Фаулера, показанный на черт. 101, съ двумя нажимными блоками и туерь имѣетъ видъ показанный на черт. 102.

Сравнительныя достоинства цѣпи и проволочнаго каната въ примѣненіи къ туерной тягѣ не вполне еще выяснены; но хорошую цѣпь можно предпочитать проволочному канату вслѣдствіе болѣе ея прочности въ туерной работѣ и болѣе большого удобства ремонта.

Суда припрягаются къ туеру на буксирахъ одно за другимъ въ разстояніи около 10 саж. одно отъ другого. Въ случаѣ, если туерная тяга производится внизъ по теченію, то для устраненія чрезмернаго возрастанія скорости хода и несчастныхъ случайностей отъ внезапной остановки туера, примѣняется тормазное судно. Судно это (черт. 103) припрягается буксиромъ къ послѣднему судну туернаго вѣса и имѣетъ шкивъ, сообщенный особымъ приводомъ съ коническимъ регуляторомъ, который въ свою очередь сообщается приводомъ съ нажимнымъ блокомъ: на шкивъ накладывается туерная цѣпь и, при движеніи туернаго вѣса, шкивъ и вмѣстѣ съ нимъ коническій регуляторъ приходятъ во вращательное движеніе; если скорость хода туернаго вѣса и скорость вращенія регулятора заходятъ за извѣстный предѣлъ, то регуляторъ отпускаетъ нажимный блокъ и блокъ

нажимаетъ цѣпь къ шкиву съ такою силою, что движеніе тормазнаго судна и всего туернаго воза останавливается.

Для опредѣленія работы машины туера предположимъ, что сопротивление движенію всего туернаго воза есть F , что возвышеніе первой точки касанія цѣпи къ туерному блоку b надъ дномъ водяного пути есть h , что вѣсь единицы длины цѣпи есть p и что цѣпь, поднимаемая туернымъ блокомъ, отдѣляется отъ дна водяного пути въ точкѣ a (черт. 104). При такихъ предположеніяхъ, по свойствамъ цѣпной линіи, будемъ имѣть:

Горизонтальное натяженіе цѣпи въ точкѣ a

$$F = pm.$$

Длина цѣпной дуги ab

$$S = \sqrt{(h+m)^2 - m^2}.$$

Вѣсь цѣпной дуги S

$$Q = pS = p\sqrt{(h+m)^2 - m^2}$$

и натянутость цѣпи на блокѣ въ точкѣ b

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{F^2 + Q^2} = \sqrt{p^2m^2 + p^2(h+m)^2 - p^2m^2} = \\ &= \sqrt{p^2(h+m)^2} = ph + pm = ph + F. \end{aligned}$$

Если абсолютная скорость движенія туернаго воза есть u_0 , то, какъ показываетъ опытъ, скорость поступательнаго движенія цѣпи по блоку есть u_1 , при чемъ

$$u_0 = 0,92 u_1$$

или

$$u_1 = \frac{u_0}{0,92}.$$

Полезная работа туернаго блока поэтому будетъ

$$T_r = Ru_1 = \frac{(ph + F) u_0}{0,92}.$$

Коэффициентъ полезной работы паровой машины туера, какъ показываетъ опытъ,

$$\phi' = \text{отъ } 0,7 \text{ до } 0,85.$$

Поэтому индикаторная работа паровой машины хорошаго туера

$$T_{ri} = \frac{T_r}{\varphi'} = \frac{(ph + F) u_0}{0,85 \times 0,92} = \frac{(ph + F) u_0}{0,78}$$

Если p и F выражаются въ пудахъ, а h и u_0 въ футахъ, то индикаторная работа машины туера въ паровыхъ лошадахъ будетъ

$$N'i = \frac{(ph + F) u_0}{0,78 \times 15} = \frac{(ph + F) u_0}{11,7}.$$

Изъ этого мы видимъ, что работа машины туера пропорціональна абсолютной скорости движенія туернаго воза и отъ скоростей теченія воды (попутныхъ или противныхъ) зависитъ лишь настолько, насколько отъ этихъ скоростей зависитъ сопротивленіе движенію туернаго воза F .

Для буксирнаго парохода мы имѣли

$$Ni = 0,1 u F,$$

гдѣ u есть относительная скорость движенія воза, т. е. $u = u_0 + c$ при ходѣ противъ теченія, $u = u_0 - c$ при ходѣ по теченію и $u = u_0$ при ходѣ въ стоячей водѣ.

Слѣдовательно для сравненія работъ парохода и туера мы можемъ написать:

1) *Въ стоячей водѣ*

$$\frac{Ni}{N'i} = \frac{0,1 u_0 F}{\frac{(ph + F) u_0}{11,7}} = \frac{1,17 F}{ph + F}.$$

Отношеніе это можетъ быть равно единицѣ, т. е. работы парохода и туера могутъ быть равны, если, при равныхъ сопротивленіяхъ воевъ (F), $ph = 0,17 F$; это возможно при небольшой величинѣ h , т. е. при малой глубинѣ водяного пути.

2) *Противъ теченія:*

$$\begin{aligned} \frac{Ni}{N'i} &= \frac{1,17 (u_0 + c) F}{(ph + F) u_0} = \frac{1,17 u_0 F + 1,17 c F}{u_0 F + u_0 ph} = \\ &= \frac{u_0 F + (0,17 u_0 + 1,17 c) F}{u_0 F + u_0 ph}. \end{aligned}$$

Отношеніе это больше единицы, т. е. работа парохода больше (менѣе выгодна) работы туера, если

$$(0,17 u_0 + 1,17 c) F > u_0 ph;$$

а это всегда можетъ имѣть мѣсто при болѣе или менѣе значительныхъ скоростяхъ теченія (c).

3) По теченію

$$\frac{Ni}{N'i} = \frac{1,17 (u_0 - c) F}{(ph + F) u_0} = \frac{u_0 F + (0,17 u_0 - 1,17 c) F}{u_0 F + u_0 ph}.$$

Отношеніе это при болѣе или менѣе значительныхъ скоростяхъ теченія меньше единицы.

Итакъ на основаніи теоретическихъ соображеній можно сказать, что работа парохода можетъ быть меньше, а слѣдовательно выгоднѣе работы туера лишь при тягѣ внизъ по теченію; въ стоячей же водѣ при малыхъ глубинахъ и противъ теченія работа туера меньше, а слѣдовательно выгоднѣе работы парохода.

Неудобства туерной тяги заключается во 1-хъ въ необходимости какъ первоначальной довольно значительной затраты на проложеніе цѣпи, такъ и послѣдующихъ расходовъ на ея ремонтное содержаніе; во 2-хъ въ томъ, что въ рѣкахъ, несущихъ значительныя количества наносовъ, цѣпь закрывается ими, и туерь, при подъемѣ ея, расходуетъ силу гораздо большую той, которая исчисляется теоретически.

Во всякомъ случаѣ, принимая во вниманіе потребные расходы на устройство и эксплуатацію туерной тяги, сравнительно съ пароходною, и мѣстныя условія, всегда можно выяснитъ, чему слѣдуетъ отдать предпочтеніе: пароходу или туеру.

Когда же тяга грузовъ должна производиться противъ сильнаго теченія, выборъ туера дѣлается неизбѣжнымъ.

На искусственныхъ каналахъ съ удобствомъ иногда могутъ быть примѣнены: электрическая энергія отъ постоянныхъ установленныхъ на берегу машинъ, для приведенія въ движеніе туерныхъ блоковъ, т. е. такъ называемый *электрическій туажъ*, изобрѣтенный французскимъ инженеромъ Галльо, а также *канатная тяга* по системѣ французскаго инженера Леви, заключающаяся въ томъ, что по бе-

регу канала поставленными на извѣстныхъ разстояніяхъ постоянными машинами приводятся въ движеніе *безконечные канаты*, зацѣпляясь за которые посредствомъ причалковъ суда могутъ двигаться по желанію.

Интересующіеся подробностями системъ Бове, Галльо и Леви, могутъ найти ихъ описаніе въ изданномъ Собраніемъ Инженеровъ Путей Сообщенія въ 1896 году отчетѣ по заграничной командировкѣ профессора Мерчинга подъ заглавіемъ: «Механическая и электрическая тяга судовъ на искусственныхъ водяныхъ путяхъ».

На путяхъ глубокихъ, подверженныхъ сильному волненію, какъ напримѣръ на озерахъ, а также вообще для быстрой перевозки цѣнныхъ грузовъ, ни тугерная, ни буксирная тяга не представляются удобными; въ сихъ случаяхъ употребляются грузовые пароходы, т. е. отдѣльные грузовыя суда, хорошей конструкціи, снабженные описанными паровыми гребными приспособленіями, рассчитанными на большую скорость хода (до 20 верстъ въ часъ).



